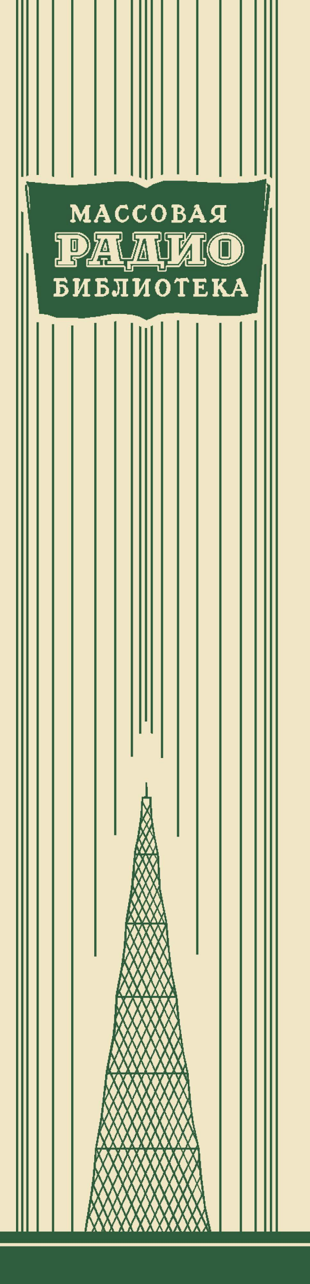



Т. Н. ВЕРБИЦКАЯ

# ВАРИКОНДЫ





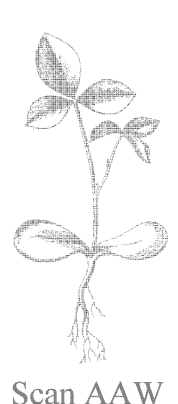

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

*Выпуск 318*

Т. Н. ВЕРБИЦКАЯ

# ВАРИКОНДЫ






ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1958 ЛЕНИНГРАД

---

*Брошюра содержит основные сведения о сегнетоэлектриках, характеристиках и конструктивных особенностях сегнетокерамических конденсаторов с резко выраженными нелинейными свойствами — варикондов. В ней рассмотрены некоторые случаи применения варикондов.*

*Брошюра рассчитана на подготовленного радиолюбителя и может быть также полезна инженерам и техникам, работающим над созданием надежной и долговечной электрохимической и радиотехнической аппаратуры.*

*Вербицкая Татьяна Николаевна*

ВАРИКОНДЫ

Редактор *И. П. Жеребцов* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

---

Сдано в пр-во 7/III 1958 г. Подписано к печати 12/XII 1958 г.
Бумага 84×108 1/32 3,28 п. л. Уч.-изд. л. 3,6
Т-11694 Тираж 40000 Цена 1 р. 45 к. Зак. 1581

---

Производственно-издат. комбинат ВИНИТИ. Люберцы, Октябрьский проспект, 403

## ВВЕДЕНИЕ

Варикондами называются сегнетокерамические конденсаторы, отличающиеся высокими нелинейными свойствами. Нелинейность сегнетоэлектриков проявляется в том, что их диэлектрическая проницаемость зависит от напряженности приложенного к ним электрического поля. Диэлектрическая проницаемость материалов, применяемых для изготовления варикондов, увеличивается с возрастанием напряженности поля, достигая максимума в области сравнительно слабых полей с напряженностью порядка 150 *в/мм,* а затем снижается. Максимальное значение диэлектрической проницаемости может в 5—6 раз превышать ее начальные значения (измеренные при напряженности поля, близкой к нулю).

Изменение диэлектрической проницаемости от напряженности поля позволяет использовать вариконды вместо электронных ламп для создания диэлектрических усилителей переменного и постоянного тока, умножителей частоты, стабилизаторов напряжения, частотных модуляторов, генераторов импульсов и других устройств, применяемых в радиотехнике, автоматике и телемеханике.

Известно, что электронные лампы имеют сравнительно ограниченный срок службы, чувствительны к перегрузкам, ударам и вибрациям. Это снижает надежность работы оборудования, в котором применяются лампы. По сравнению с электронными лампами вариконды имеют более высокую механическую прочность, лучше выдерживают воздействие тряски, вибраций и ударов. Они могут работать в условиях повышенной влажности, разреженной атмосферы и повышенных давлений. Срок службы их практически неограничен. Кроме того, сегнетокерамические конденсаторы отличаются дешевизной, простотой конструкции, небольшими размерами и поэтому удобны для создания малогабаритной аппаратуры.

Вместе с тем вариконды обладают рядом серьезных недостатков. Сравнительно высокие значения диэлектри-

ческих потерь, зависимость ряда характеристик от температуры и нестабильность их во времени затрудняют широкое распространение варикондов. Указанные и некоторые другие недостатки, несомненно, будут частично или полностью устранены при дальнейшем исследовании сегнетоэлектриков. В сочетании с новыми ферромагнитными материалами и полупроводниковыми приборами вариконды найдут применение при создании безотказно действующей долговечной аппаратуры.

В отечественной литературе вариконды освещены пока еще недостаточно. Однако для внедрения варикондов в различные области техники важно, чтобы широкий круг радиолюбителей был знаком с их устройством, принципом работы, характеристиками, конструктивными особенностями и возможными применениями. Целью данной брошюры и является краткое освещение этих вопросов.

*ГЛАВА ПЕРВАЯ*

# ОБЩИЕ СВОЙСТВА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

Сегнетоэлектриками называют особую группу диэлектриков, которые ниже некоторой температуры или в некотором температурном интервале обладают спонтанной, т. е. самопроизвольной, электрической поляризацией, существующей независимо от внешнего поля. Сегнетоэлектрические свойства обнаруживаются у ряда кристаллических твердых диэлектриков.

Внешне в кристалле наличие спонтанного электрического момента[1] не проявляется. Обычно кристалл состоит из отдельных областей — доменов, поляризованных в разных направлениях, и поэтому в целом он не имеет электрического момента. Такое состояние кристалла соответствует минимуму энергии и является наиболее устойчивым. На рис. 1 изображены микрофотография монокристалла[2] титаната бария, в котором обрисовывается доменное строение в виде густо заштрихованных областей, и схема расположения доменов, ориентированных в разных направлениях вследствие теплового движения.

При специальном режиме охлаждения кристалла ниже некоторой температуры, называемой точкой Кюри, или воздействии внешнего электрического поля можно добиться

---

[1] Электрическим моментом диполя, т. е. пары одинаковых по величине, но разноименных зарядов $+Q$ и $-Q$, называется произведение заряда $Q$ на расстояние между этими зарядами. Величина электрического момента характеризует степень поляризации диэлектрика.

[2] Монокристаллами называют искусственно выращиваемые или находимые в естественном состоянии тела, имеющие правильное строение кристалла, но не обязательно имеющие внешнюю форму кристаллов. В отличие от поликристаллов, состоящих из элементарных монокристалликов, ориентированных по всевозможным направлениям, монокристаллы характеризуются высокой однородностью и анизотропией, т. е. неодинаковостью свойств в различных направлениях.

возникновения электрического момента во всем кристалле. Тогда кристалл будет состоять целиком из одного домена и спонтанная поляризация в нем будет одинаково направлена во всех его частях. Но и в этом случае поляризация внешне не проявляется, потому что она компенсируется оседающими на поверхности кристалла свободными ионами из воздуха или внутренних областей кристалла. Изменение спонтанного электрического момента можно получить при нагревании или охлаждении образца или воздействии на

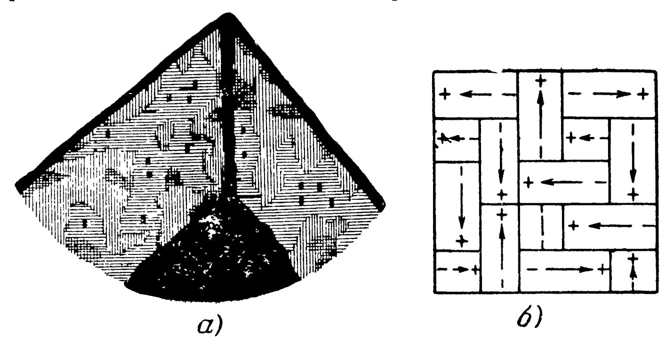



Рис. 1. Доменная структура в монокристалле титаната бария (*а*) и схема расположения доменов, разориентированных тепловым движением (*б*)

него электрического поля. Всякое изменение электрического поля по величине, напряженности или направлению приводит к переориентации поляризованных областей, изменению их объема и направления поляризации.

В настоящее время считают, что сегнетоэлектрические свойства, появляющиеся при переходе через точку Кюри, обусловлены возникновением в кристалле дипольного электрического момента из-за смещения ионов, приводящего к искажению кристаллической решетки. При воздействии электрического поля направление дипольных моментов может быть изменено.

В результате смещений ионов элементарные ячейки кристалла становятся электрическими диполями, которые в пределах одного домена параллельны друг другу. Такое параллельное положение диполей является причиной спонтанной поляризации, обусловливающей основные свойства сегнетоэлектриков.

Для большинства сегнетоэлектриков существует одно значение температуры (точка Кюри), выше которого спонтанная поляризация исчезает и вещество перестает быть

сегнетоэлектриком. У сегнетовой соли имеются две точки Кюри. Спонтанная поляризация проявляется в области температур между этими точками.

Сегнетоэлектрики характеризуются высокими и сверхвысокими значениями диэлектрической проницаемости и сильной зависимостью ее от температуры. На характер этой зависимости влияет величина напряженности приложенного переменного поля. В областях слабых полей диэлектрическая проницаемость достигает максимального значения вблизи точки Кюри, а при снижении и повышении температуры резко уменьшается. При некотором повышенном значении напряженности поля диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика принимает высокое значение и мало зависит от температуры в широком интервале ее изменений.

Явление поляризации диэлектриков принято характеризовать величиной электрического момента единицы объема. Эту величину называют поляризацией диэлектрика и обозначают буквой $P$. Отношение поляризации $P$ к напряженности поля $E$ носит название диэлектрической восприимчивости $\varkappa$:

$$\varkappa = \frac{P}{E}.$$

Аналогичные величины и соотношения существуют и для ферромагнитных тел.

В обычных диэлектриках величина $\varkappa$ мало зависит от температуры и напряженности поля. Поэтому для таких диэлектриков величины $P$ и $E$ пропорциональны и $\varkappa$ является коэффициентом пропорциональности между ними:

$$P = \varkappa E.$$

Сегнетоэлектрики в отличие от обычных диэлектриков, даже вне области спонтанной поляризации, характеризуются своеобразной температурной зависимостью диэлектрической восприимчивости. Вблизи точки Кюри (и выше) она подобна температурной зависимости магнитной восприимчивости ферромагнетиков (закон Кюри—Вейсса) и заключается в обратной пропорциональности между диэлектрической восприимчивостью и разностью температур $(T-\Theta)$:

$$\varkappa (T - \Theta) = \text{const},$$

где Т—наблюдаемая температура;
$\Theta$—температура Кюри;
$\varkappa$ — диэлектрическая восприимчивость.

Ввиду того, что для сегнетоэлектриков диэлектрическая проницаемость $\varepsilon$ практически пропорциональна $\varkappa$, закон Кюри—Вейсса для сегнетоэлектриков может быть выражен в следующем виде:

$$\varepsilon(T - \Theta) = \text{const}.$$

При переходе через точку Кюри скачкообразно изменяется ряд свойств сегнетоэлектрика: теплоемкость, структура кристаллической решетки, показатель преломления вещества и некоторые другие свойства.

Сегнетоэлектрики являются также пьезоэлектриками. Кроме того, в сегнетоэлектрической области возникает связанная со спонтанной поляризацией электрострикционная[1] деформация.

В последнее время большой интерес вызывают нелинейные свойства сегнетоэлектриков; они проявляются в том, что в сегнетоэлектрической области величина поляризации диэлектрика $P$ и диэлектрическая проницаемость $\varepsilon$ являются нелинейными функциями напряженности поля.

Диэлектрическая восприимчивость всегда связана с диэлектрической проницаемостью простым соотношением:

$$\varepsilon = 1 + 4\pi\varkappa.$$

В сегнетоэлектриках диэлектрическая проницаемость достигает значений тысяч и десятков тысяч единиц. Поэтому для них $\varepsilon \approx 4\pi\varkappa$, и тогда

$$P \approx \frac{\varepsilon}{4\pi} E.$$

Для всех сегнетоэлектриков установлено, что при увеличении напряженности переменного электрического поля диэлектрическая проницаемость возрастает, достигает максимума, а затем снижается. Наклон кривой $\varepsilon \approx f(E)$, величина диэлектрической проницаемости в области максимума и в области слабых полей, а также напряженность поля, при которой $\varepsilon$ достигает максимального значения, определяются составом и структурой сегнетоэлектрика.

Поведение сегнетоэлектриков в электрическом поле во многом аналогично поведению ферромагнетиков в магнитном поле. Характер зависимости диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля аналогичен зависимости магнитной проницаемости от напряженности

[1] Электрострикцией называется изменение размеров диэлектриков при электрической поляризации.

магнитного поля. Под действием электрического поля в сегнетоэлектриках возникают явления насыщения и гистерезиса, так же как и в магнитных материалах при воздействии на них магнитного поля.

Кривая зависимости величины поляризации сегнетоэлектриков от напряженности электрического поля имеет тот же характер, что и кривая зависимости магнитной индукции ферромагнетиков от напряженности магнитного поля. Она не может быть даже приближенно заменена прямой линией.

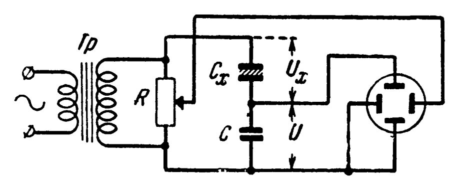



Рис. 2. Схема для исследования зависимости заряда конденсатора от напряжения

При увеличении напряженности поля заряд на обкладках конденсатора из сегнетоэлектрика растет, а затем достигает насыщения.

Исследование зависимости заряда на обкладках сегнетоэлектрического конденсатора от напряженности поля производится с помощью схемы с использованием электронного осциллографа, изображенной на рис. 2. Эта схема обычно питается от электросети с частотой 50 *гц* через повышающий трансформатор *Тр*. Потенциометр *R* служит для регулировки напряжения на пластинах горизонтального отклонения осциллографа.

Горизонтальное отклонение электронного луча пропорционально напряжению, приложенному к испытываемому конденсатору $C_x$. Вертикальное отклонение пропорционально напряжению на вспомогательном конденсаторе $C$, который включен последовательно с конденсатором $C_x$. Заряды на последовательно соединенных конденсаторах всегда равны. Следовательно, $UC = U_x C_x$, откуда $U = \frac{U_x C_x}{C} = \frac{Q_x}{C}$.

Таким образом, вертикальное отклонение луча пропорционально заряду конденсатора $C_x$. За один полный цикл изменения переменного напряжения электронный луч опишет на экране замкнутую кривую зависимости заряда конденсатора от напряженности поля $Q \approx f\ (E)$, аналогичную петлям магнитного гистерезиса (рис. 3). Ширина петли гистерезиса служит для оценки потерь в конденсаторе.

Для анализа работы цепей с нелинейными элементами из сегнетоэлектриков и установления области их применения используются методы, аналогичные принятым для расчетов цепей с магнитными элементами. Зависимость заряда нелинейного конденсатора от напряженности поля можно приближенно представить различными функциями. Точнее всего эта зависимость выражается гиперболическим синусом.

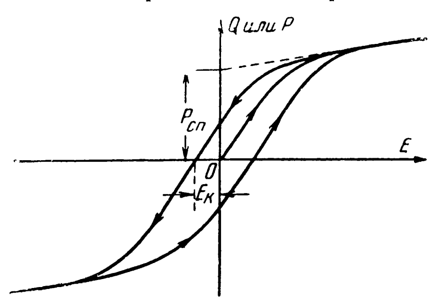



Рис. 3. Типичная петля гистерезиса сегнетоэлектриков

Имея такую зависимость, составляют уравнение для тока применительно к конкретной схеме и, решая это уравнение, находят оптимальные режимы для использования нелинейных элементов в данной схеме.

Несмотря на различие физических процессов, обусловливающих нелинейность характеристик сегнетоэлектриков и магнитных материалов, проведение аналогии между ними способствует лучшему изучению сегнетоэлектриков.

Практическое осуществление радиотехнических устройств с использованием нелинейных сегнетоэлектриков стало возможным лишь после разработки сегнетокерамических материалов с резко выраженными нелинейными свойствами. Именно из этих материалов созданы сегнетоэлектрические конденсаторы — «вариконды».

## *ГЛАВА ВТОРАЯ*

# СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

### Сегнетова соль

Явление спонтанной поляризации было открыто 30 лет назад у сегнетовой соли. Впоследствии для диэлектриков с аналогичными свойствами в СССР было принято название «сегнетоэлектрики». В иностранной литературе эти вещества, являющиеся электрическими аналогами ферромагнети-

ков, называют обычно ферроэлектриками, что отнюдь не указывает на присутствие в их составе железа.

Все известные сегнетоэлектрики в соответствии с механизмом возникновения спонтанной поляризации в них можно разбить на две основные группы.

Первую группу составляют вещества, содержащие водород (протонные сегнетоэлектрики). К ним относятся сегнетова соль, родственные ей смешанные кристаллы и некоторые другие химические вещества.

Ко второй группе относятся титанат бария и большой класс материалов, родственных с ним по структуре, а также смеси титаната бария с некоторыми другими соединениями.

Аномальные свойства сегнетовой соли были обнаружены в 1918 г. Андерсеном, а позднее — Валашеком и др. Детальные экспериментальные исследования этих свойств выполнили в 30-х годах И. В. Курчатов и П. П. Кобеко. Они же дали первое теоретическое объяснение особых диэлектрических свойств этого вещества. В ходе экспериментов сегнетоэлектрические свойства обнаружились также у ряда смешанных кристаллов, родственных сегнетовой соли.

Сегнетова соль получается из натуральной винной кислоты и является двойной натриево-калиевой солью винной кислоты с четырьмя молекулами кристаллизационной воды. Ее сегнетоэлектрические свойства могут быть объяснены существующими в ней диполями, образованными водородом и кислородом.

Кристаллическая решетка сегнетовой соли содержит положительные ионы водорода и отрицательные ионы кислорода, расположенные несимметрично друг относительно друга и образующие диполи. Энергия взаимодействия диполей оказывается достаточной для ориентации их в одном направлении в некоторых микрообластях (доменах).

Теория, основанная на этих представлениях, приводит к хорошему количественному совпадению с результатами измерений температурной зависимости $\varepsilon$ и поляризации кристалла. Заметное снижение $\varepsilon$ при повышении частоты до $5 \cdot 10^8$ *гц* является подтверждением этой теории.

При повышении температуры до 55° С сегнетова соль распадается и частично (а при 58° С — полностью) растворяется в выделяющейся кристаллизационной воде. Этот процесс называется «плавлением» кристалла сегнетовой соли и является необратимым. Кроме того, кристаллы сегнетовой соли могут дать трещины даже при незначительном нагревании.

Сегнетова соль растворима в воде. Поэтому ее кристаллы можно резать на пластины тонкой нитью, смачиваемой водой, а затем шлифовать на какой-либо увлажненной поверхности.

Кристаллы сегнетовой соли легко поддаются механической обработке на фрезерных станках при высокой скорости резания и распиливаются ленточными пилами.

У сегнетовой соли имеется резко выраженная анизотропия. Только вдоль одной оси кристалла проявляются сегнетоэлектрические свойства: спонтанная поляризация, аномально высокая диэлектрическая проницаемость, резко зависящая от температуры и напряженности поля, гистерезис и другие особые свойства.

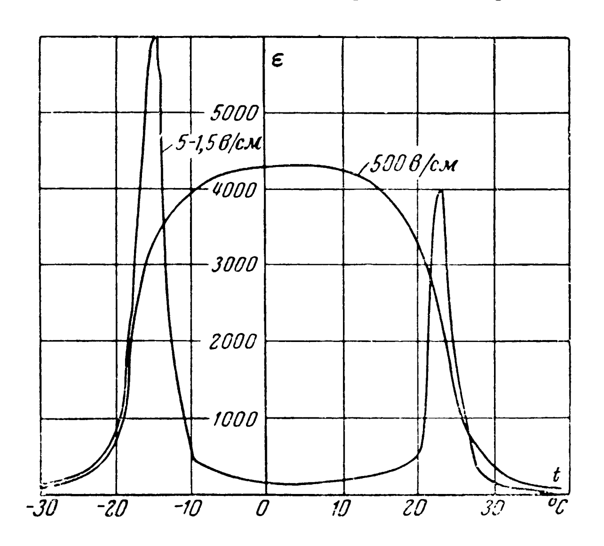



Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости сегнетовой соли от температуры при разных значениях напряженности переменного поля.

Диэлектрическая проницаемость вдоль двух других осей кристалла имеет значение около 10—12 и не зависит от напряженности электрического поля.

Для сегнетовой соли характерны две точки Кюри (22,5 и —15° С), при которых ε достигает максимальных значений. В слабых полях диэлектрическая проницаемость при температурах верхней и нижней точки Кюри достигает значений 4 000 и 6 000 (рис. 4).

Как видно из рис. 4, ход температурной зависимости диэлектрической проницаемости зависит от величины напряженности электрического поля.

При напряженности поля, равной 500 *в/см,* во всем интервале температур между верхней и нижней точками Кюри диэлектрическая проницаемость имеет значение около 4 000, а за пределами этого интервала она снижается до нескольких единиц ($\varepsilon=7$ при температуре —157° С) и изменяется мало.

Температура Кюри меняется от механического сжатия и гидростатического давления. Последнее повышает обе температуры Кюри и увеличивает интервал между ними.

Электрическая прочность сегнетовой соли в воздухе может иметь весьма различные значения. Опасность пробоя сильно возрастает, если в кристалле имеются даже незначительные трещины. В масле при высоком гидростатическом давлении электрическая прочность сегнетовой соли равна 600 *кв/см.*

При использовании сегнетовой соли в технике и измерениях с ней обычно соблюдаются следующие условия. Кристалл должен быть с чистой и гладкой поверхностью, однородным и оптически совершенным, т. е. не содержащим посторонних включений и имеющим одинаковый показатель светопреломления в определенных направлениях. Он должен иметь плотный контакт с электродами, но при этом недопустимо механическое напряжение, создаваемое электродами или держателями.

Диэлектрическая проницаемость сегнетовой соли зависит от частоты. С увеличением частоты она вначале медленно снижается, а при частотах порядка $10^8$—$10^9$ *гц* резко падает до значения порядка нескольких единиц.

Из всех известных в настоящее время сегнетоэлектриков сегнетова соль отличается наиболее резкой зависимостью поляризации и диэлектрической проницаемости от напряженности поля (в области слабых полей).

Диэлектрический гистерезис для сегнетовой соли зависит от температуры. Наиболее широкие петли гистерезиса соответствуют температуре около 0° С, а по мере приближения к точкам Кюри они постепенно становятся у́же и меньше.

Выше +32 и ниже —26° С диэлектрический гистерезис исчезает, а поляризация становится пропорциональной напряженности поля.

Величина спонтанной поляризации сегнетовой соли изменяется с температурой и около 3° С достигает максимального значения, равного 740 CGSE.

Кривая зависимости поляризации от напряженности поля $P \parallel f$ $(E)$ обычно строится по данным осциллографических исследований и подобна кривой на рис. 3.

В этой зависимости характерны три области. Первая соответствует линейному возрастанию поляризации при очень слабых полях. Во второй области с увеличением напряженности поля происходит быстрое возрастание поляризации, которое заканчивается для сегнетовой соли приблизительно при 150—200 *в/см*. Затем в полях с напряженностью 250—300 *в/см* наступает резко выраженное насыщение.

Диэлектрическая проницаемость сегнетовой соли достигает максимального значения $\varepsilon_{макс}=20\,000$ в полях с напряженностью около 100 *в/см*, затем снижается и при напряженности поля около 1 000 *в/см* уменьшается до значений, близких к начальным.

Смеси сегнетовой соли с изоморфными ей веществами, близкими по составу и кристаллической структуре, но не обладающими сегнетоэлектрическими свойствами (например, с натроаммониевой и другими солями), являются сегнетоэлектриками. С уменьшением концентрации сегнетовой соли диэлектрическая проницаемость смеси заметно падает, а точки Кюри сдвигаются в область более низких температур. Физико-химические свойства смесей мало отличаются от свойств сегнетовой соли.

Резкое возрастание диэлектрической проницаемости при увеличении напряженности поля и ее последующее снижение, т. е. высокая нелинейность в области весьма слабых полей, являются существенным преимуществом сегнетовой соли по сравнению с другими сегнетоэлектриками при использовании ее в качестве нелинейного элемента. Однако нелинейные свойства сегнетовой соли сохраняются только в сравнительно узком интервале температур между верхней и нижней точками Кюри (от —15 до +22,5° С). Сегнетова соль имеет малую механическую прочность и низкую температуру разложения (55° С). Кроме того, ее нелинейные свойства очень резко зависят даже от незначительных механических воздействий на кристалл. Последнее резко ограничивает возможность использования ее в качестве материала для изготовления нелинейных элементов различных радиотехнических и электротехнических устройств.

В 1935—1938 гг. были обнаружены сегнетоэлектрические

свойства у фосфатов и арсената калия. Ввиду того, что сегнетоэлектрические свойства у них проявляются только при значительных отрицательных температурах, они не получили распространения в технике в качестве сегнетоэлектрических материалов.

## Титанат бария

Советские ученые Б. М. Вул и И. М. Гольдман в 1944 г. открыли и всесторонне изучили сегнетоэлектрические свойства титаната бария. Это открытие привело к получению новых керамических сегнетоэлектриков. Новые вещества обладают весьма простой и прочной кристаллической решеткой, и их особые свойства не связаны с наличием ионов водорода. Впервые свойства титаната бария изучались на поликристаллических образцах, полученных из технического сырья способом керамической технологии. Позднее были выращены монокристаллы титаната бария, имеющие аналогичные свойства.

Для титаната бария характерны температурная зависимость диэлектрической проницаемости, температура Кюри (+120° С), диэлектрический гистерезис и зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности поля.

Было высказано предположение об изменении структуры титаната бария при нагреве. Впоследствии это полностью подтвердилось.

Диэлектрическая проницаемость как поликристаллического, так и монокристаллического титаната бария имеет при изменении температуры три максимума. Температура главного максимума (точка Кюри) для титаната бария равна 120° С. Выше этой точки температурный коэффициент диэлектрической проницаемости отрицателен и тем больше, чем ближе к точке Кюри. Зависимость $\varepsilon = f\ (t)$ подчиняется закону Кюри — Вейсса.

В области температур ниже точки Кюри диэлектрическая проницаемость уменьшается и переходит еще через два малых максимума при температуре около 0 и —80° С (рис. 5). Эти максимумы, так же как и первый, обусловлены изменением величины и направления спонтанного электрического момента в результате изменений структуры кристаллической решетки. При дальнейшем снижении температуры от —80° С диэлектрическая проницаемость уменьшается.

В температурной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta$) также обнаруживаются три максимума, причем вблизи точки Кюри максимум выражен менее резко,

чем при двух других температурах. Максимумы tg δ смещены влево по сравнению с максимумами ε и проявляются при температурах, соответствующих наиболее резкому росту диэлектрической проницаемости.

При увеличении напряженности поля ε и tg δ значительно возрастают и характер их температурной зависимости изменяется. Два нижних максимума ε и tg δ становятся более четко выраженными.

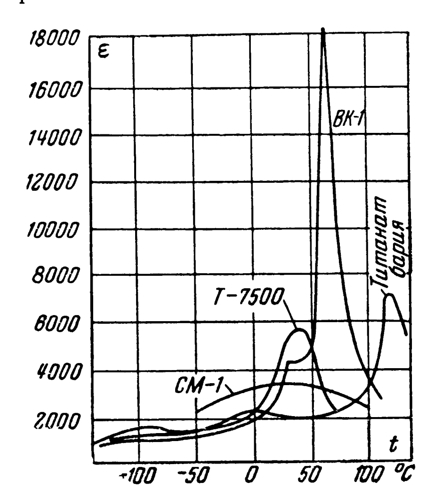



Рис. 5. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария и материалов Т-7500, СМ-1 и ВК-1, измереннная в области слабых полей.

Диэлектрическая проницаемость ε титаната бария зависит от частоты. При комнатной температуре и малой напряженности поля с увеличением частоты от 50 до $10^7$ *гц* ε медленно снижается на 10—15%, а затем при частотах $10^9$—$10^{10}$ *гц* наблюдается резкое уменьшение ε до значений, равных нескольким сотням.

Тангенс угла диэлектрических потерь в области радиочастот с увеличением частоты возрастает сначала медленно, а затем быстрее и при частотах $10^9$—$10^{10}$ *гц* он становится в несколько десятков раз больше, чем при частоте в несколько мегагерц. Величина tg δ при 1 *Мгц* составляет около 0,01—0.02.

Специфическая зависимость диэлектрической проницаемости от температуры сохраняется вплоть до сверхвысоких

частот и в точке Кюри ε достигает максимального значения, равного нескольким тысячам. Это свидетельствует о сохранении сегнетоэлектрических свойств титаната бария в области сверхвысоких частот.

У конденсаторов из титаната бария наблюдается нелинейная зависимость заряда от напряженности поля, причем насыщение наступает при 8—10 *кв/см*. Из кривой зависимости поляризации $P$ от напряженности поля $E$ можно определить ряд характеристик сегнетоэлектрика. Если продолжить ветвь насыщения петли гистерезиса до пересечения с осью ординат, как это показано на рис. 3, то получим спонтанную поляризацию $P_{сп}$. Участок оси абсцисс, отсекаемый петлей гистерезиса, называется коэрцитивной силой $E_к$.

Спонтанная электрическая поляризация титаната бария зависит от температуры; вблизи точки Кюри она резко падает и при 120° С становится равной нулю. Величина этой поляризации при комнатной температуре равна примерно 12—16 *мкк* (микрокулон) на 1 *см*², что во много раз превосходит максимальное значение спонтанной поляризации сегнетовой соли, равное 0,26 *мкк* на 1 *см*².

Диэлектрическая проницаемость и tg δ титаната бария зависят от напряженности переменного поля. В области слабых полей (до напряженности порядка 100 *в/см*) эта зависимость близка к линейной, а затем рост ε и tg δ усиливается.

При напряженности поля 6—8 *кв/см* диэлектрическая проницаемость достигает максимума, равного 6 000—8 000, а затем она снижается. Максимум tg δ несколько смещен в область более слабых полей относительно максимума ε. Этот максимум tg δ соответствует участку наиболее быстрого роста ε.

В случае отрицательных температур крутизна нелинейных характеристик $\varepsilon = f(E_\sim)$ и $\operatorname{tg}\delta = f(E_\sim)$ оказывается более высокой, чем при комнатной температуре. Насыщение вблизи второго и третьего низкотемпературных максимумов ε наступает при меньшей величине напряженности поля, чем при 20° С.

Высокое значение диэлектрической проницаемости, наличие петли гистерезиса и зависимости ε от напряженности поля проявляются как при положительных температурах до 120° С, так и при отрицательных вплоть до —195° С. Как видно, титанат бария является сегнетоэлектриком в широком интервале температур. В этом заключается его существенное преимущество перед сегнетовой солью.

Титанат бария, так же как и некоторые другие кристаллы с высоким значением диэлектрической проницаемости, имеет кристаллическую решетку типа минерала перовскита.

Идеальная кубическая решетка типа перовскита представлена на рис. 6, *а*. В центре куба расположен ион бария (стронция или кальция), в углах куба—ионы титана, в центрах ребер—ионы кислорода. Каждый ион титана окружен шестью ионами кислорода и оказывается в центре кислородного октаэдра[1]. Таким образом, ион бария (стронция или кальция) окружен восемью ионами титана и вместе с тем восемью кислородными октаэдрами.




Рис. 6. Идеальная кубическая структура типа перовскита (*а*) и температурные изменения кристаллической решетки титаната бария (*б*).

*1*—кубическая решетка при температуре выше точки Кюри (120° С); *2*—тетрагональная при 5° С $<t<$120° С; *3*— ромбическая при —70° С$<t<$5° С; *4*—ромбоэдрическая при $t<$—70° С.

Из трех титанатов (бария, стронция, кальция) только титанат бария в области положительных температур ( до +120° С) является сегнетоэлектриком, что объясняется его особой структурой.

Б. М. Вул указал, что только в титанате бария расстояние между ионами титана и кислорода больше суммы их радиусов. Поэтому ион титана может смещаться из своего центрального (или симметричного) положения и образовывать диполь с одним или двумя ионами кислорода. Совокупность дипольных электрических моментов создает спонтанную электрическую поляризацию. У титаната кальция или стронция при комнатной температуре расстояние между ионами титана и кислорода меньше суммы их радиусов, ион титана не может смещаться, и оба соединения не являются сегнетоэлектриками.

[1] Октаэдр — геометрическое тело, имеющее 8 граней. Его можно получить, приложив друг к другу основаниями две четырехгранные пирамиды.

В зависимости от температуры титанат бария изменяет свою структуру при +120° С, около 5° С и при —70° С, как показано на рис. 6, *б*. Выше точки Кюри он имеет кубическую решетку и не обладает сегнетоэлектрическими свойствами. При 120° С происходит переход в тетрагональную решетку (причем одна ось лишь на 1% становится больше двух других), при нуле в ромбическую, а около —80° С —в ромбоэдрическую модификацию. Три последние фазы являются сегнетоэлектрическими.

Переход его из одной структуры в другую сопровождается изменением спонтанной поляризации, коэффициента линейного расширения, теплоемкости, оптического показателя преломления и диэлектрической проницаемости. Последняя изменяется особенно резко.

В зависимости от условий получения поликристаллический титанат бария может иметь при комнатной темперутуре различные кристаллические решетки. Сегнетоэлектриком он является при комнатной температуре только тогда, когда кристаллизуется в тетрагональную решетку типа перовскита (рис. 6,*б*).

## Новые сегнетоэлектрики

Помимо титаната бария, сегнетоэлектриками являются многие другие материалы. Сегнетоэлектрические свойства обнаружены Г. А. Смоленским у таких химических соединений, как цирконат свинца, титанат свинца, титанат кадмия, титанат лития, пирониобат кадмия, метаниобат свинца, трехокись вольфрама и др.

Кристаллическое строение этих веществ различно. Многие из них, так же как и титанат бария, имеют структуру типа перовскита, у других структура иная. Применяются также смеси титаната бария (или другого сегнетоэлектрика) с близкими ему по составу и структуре веществами, причем последние сами могут и не быть сегнетоэлектриками. Так, например, сегнетоэлектрическими свойствами обладают твердые растворы, образованные титанатом бария с другими титанатами, цирконатами и станнатами. При этом могут заменяться как ионы бария, так и ионы титана, что приводит к изменению структуры или параметров кристаллической решетки и электрических характеристик материалов.

Добавление к титанату бария ионов стронция, олова, циркония, лантана, калия, неодимия и ряда других материалов приводит к смещению точки Кюри в сторону более низких температур. В смесях, содержащих, кроме титаната бария,

цирконат свинца, титанат свинца или небольшие добавки кремнезема, наблюдается повышение температуры Кюри.

Титанат свинца имеет точку Кюри около 500° С; для твердых растворов титаната бария и титаната свинца она лежит в пределах 120—500° С.

Если взять два исходных сегнетоэлектрика—титанат бария и титанат стронция, то при спекании их друг с другом в любых соотношениях образуются твердые растворы, также обладающие сегнетоэлектрическими свойствами.

Точка Кюри титаната стронция находится около —250° С. По мере увеличения содержания в растворе титаната стронция точка Кюри вещества смещается от 120 до —250° С. Вместе с этим уменьшается размер элементарной ячейки кристалла. Существует почти линейная зависимость между количеством одного из компонентов раствора, температурой точки Кюри и размерами решетки в этих смесях.

Помимо изменения точки Кюри смеси титаната бария с другими соединениями различаются величиной диэлектрической проницаемости и характером ее температурной зависимости. Некоторые смеси имеют резко выраженную зависимость $\varepsilon$ от температуры, а у других температура почти не влияет на величину $\varepsilon$. Различные смеси отличаются друг от друга технологией изготовления, удельным объемным сопротивлением, величиной диэлектрических потерь и другими характеристиками.

Из большого числа известных в настоящее время сегнетоэлектриков практическое применение получили немногие. Это связано либо с трудностью их изготовления, либо с низкими электрическими характеристиками. Например, материалы, содержащие большое количество соединений свинца, отличаются низким удельным сопротивлением, высокими диэлектрическими потерями и сложной технологией производства.

Для промышленного применения представляют интерес материалы, у которых сегнетоэлектрические свойства проявляются по крайней мере в нормальных условиях или в широкой области температур, включающей интервал от +60 до —60° С. Наиболее перспективными являются материалы с высокой температурой Кюри, в частности керамические материалы, отличающиеся высокой механической прочностью и термической стойкостью.

Отечественной промышленностью в настоящее время изготовляются в серийном производстве следующие сегнетокерамические материалы:

1. Титанат бария и материал Т-1700, по свойствам близкий к чистому титанату бария и отличающийся от него сниженным углом диэлектрических потерь и более простой технологией изготовления.

2. Материал Т-7500, названный так по значению диэлектрической проницаемости в точке Кюри ($\varepsilon \approx 7\,500$ при 36—40° С).

3. Материал СМ-1, отличающийся сравнительно слабой зависимостью диэлектрической проницаемости от температуры; при нормальной температуре $\varepsilon \approx 3\,000$, а при температурах +100 и —50° С величина $\varepsilon$ снижается до 2 000 (см. рис. 5).

4. Материал ВК-1 с наиболее резко выраженными нелинейными свойствами.

Все эти сегнетоэлектрики служат для изготовления малогабаритных керамических конденсаторов. Для материалов Т-7500 и СМ-1 это применение является основным. Титанат бария служит главным образом для создания пьезоэлементов, а ВК-1 — для варикондов.

Керамические пьезоэлементы обладают сильно выраженным пьезоэффектом и высокой механической прочностью. При массовом изготовлении стоимость их значительно ниже, чем пьезоэлементов из кварца и сегнетовой соли. Пьезоэлементы из титаната бария применяются для генерирования ультразвуковых колебаний, измерения давлений, ультразвуковой дефектоскопии и других целей.

Материал Т-7500 содержит в качестве основных составляющих титанат бария, титанат стронция и титанат кальция. Температурная зависимость его диэлектрической проницаемости представлена на рис. 5, из которого видно, что при комнатной температуре $\varepsilon$ достигает значений 4 000—5 000. Сегнетоэлектрические свойства у Т-7500 обнаруживаются в интервале от + 50° С до весьма низких отрицательных температур. Этот материал отличается достаточно высоким удельным объемным сопротивлением. При температуре 100° С это сопротивление $\rho \geqslant 10^{13}$ *ом·см*. С ростом температуры от 100 до 600° С величина $\rho$ уменьшается по экспоненцальному закону.

Сегнетоэлектрические конденсаторы из материала Т-7500 применяются в случаях, когда не требуется высокая стабильность емкости, а важно, чтобы емкость конденсатора во всем рабочем интервале температур оставалась не менее некоторой заданной величины. Разработаны сегнетокс-

рамические конденсаторы нескольких типов на высокие и низкие напряжения.

Конденсаторы на низкие напряжения предназначены для фильтров и блокировок в цепях низкой частоты. Они могут работать при относительной влажности воздуха до 98% и температурах от —60 до +80° С. Такие конденсаторы постоянной емкости изготовляются различных типов: в виде блока пластин (КПС), дисков (КДС) и трубок (КТС). Их условные наименования расшифровываются так: керамические пластинчатые (дисковые или трубчатые) сегнетокерамические. Номинальные значения емкости у них 1 200—40 000 *пф*.

Высоковольтные конденсаторы применяются в радиовещательной аппаратуре в качестве фильтровых при рабочем постоянном напряжении до 20 *кв*. Этим конденсаторам присвоено название КОБ (керамические опрессованные боченочные). Диаметр и высота цилиндра у них около 30 *мм*. Конденсаторы КОБ имеют защитное пластмассовое покрытие. Емкость их при температуре 20±5° С не ниже 500 *пф*, сопротивление изоляции — не менее 500 *Мом*.

Дисковые конденсаторы из материала СМ-1 применяются в переходных устройствах при постоянном рабочем напряжении 300 *в*. Номинальное значение емкости у них составляет 200 *пф*—0,01 *мкф*, причем диаметр диска не превышает 15 *мм*. Вследствие малых размеров и высокой механической прочности эти конденсаторы находят широкое применение.

За рубежом, особенно в Германии и США, распространены сегнетокерамические материалы, содержащие титанаты бария и стронция. Они получили различные названия или обозначения (BS-21, эпсилян, R-966, R-336, R-420, аэровакс и др.). По составу и свойствам они незначительно отличаются от Т-7500. Например, точка Кюри материала BS-21 находится около 20° С; при этом максимальное значение диэлектрической проницаемости составляет около 6 000—7 000. Температурная зависимость $\varepsilon$ примерно такая же, как у Т-7500. Материал BS-21 получил универсальное распространение за рубежом для изготовления малогабаритных конденсаторов и нелинейных сегнетокерамических элементов. Применение их рассчитано на сравнительно узкий интервал температур с верхним пределом, незначительно превышающим 20° С.

Керамические сегнетоэлектрики изготовляются из недефицитного сырья и отличаются сравнительно простой технологией производства. Титанат бария имеет простой состав

и изготовляется способом, принятым в производстве непластичных керамических материалов.

В качестве исходных веществ используются двуокись титана и углекислый барий.

Технически чистая двуокись титана предварительно обжигается при температуре около 1 300° С, тщательно измельчается и смешивается с углекислым барием мокрым способом. После сушки в подогретую массу вводится в качестве связки расплавленный парафин. Оформление деталей производится методом прессования, штампования на прессах-автоматах или полуавтоматах, обеспечивающих получение удельного давления 500—800 *кг/см*², или методом протягивания тонкостенных трубочек через мундштучный пресс. Обжиг образцов производится в электрических печах с силитовыми нагревательными стержнями при температуре около 1 400° С.

Исследования показывают, что химическая реакция образования титаната бария или его синтез происходят полностью уже при температуре 1 300° С. Для получения плотно спеченного непористого черепка должен обеспечиваться достаточно узкий интервал температуры обжига (около ±10° С), что затрудняет приготовление крупных деталей.

Материал Т-1700 получается введением в титанат бария в небольших количествах соединений свинца, например сурика. Это дает упрощение технологии производства и некоторое снижение температуры спекания, причем величина диэлектрической проницаемости и другие электрические характеристики изменяются мало.

В случае приготовления керамики Т-7500 или других сегнетокерамических материлов, содержащих титанат бария в качестве основного сырья, производится предварительное синтезирование титаната бария при температуре около 1 300° С, а затем в массу вводятся различные добавки либо в виде титанатов (например, титаната стронция или титаната кальция, предварительно синтезированные и тщательно измельченные), либо в виде окислов и других химических соединений.

Для получения высокой степени однородности керамики, содержащей титанаты бария и стронция и другие составляющие, углекислые соединения сначала переводят в раствор, а затем осаждают на зерна двуокиси титана, равномерно распределенные в растворе.

Оформление изделий во всех случаях производится по общепринятой в керамике технологии непластичных материалов.

## Старение сегнетокерамики

Существенным недостатком сегнетокерамики со сверхвысоким значением диэлектрической проницаемости является нестабильность свойств во времени. При хранении конденсаторов из сегнетокерамики в нормальных условиях наблюдается уменьшение $\varepsilon$ и $\operatorname{tg}\delta$; сопротивление изоляции при этом не меняется.

Изменение $\varepsilon$ против первоначального значения достигает 30—35% и происходит главным образом в первые 30—60 дней после изготовления образцов. Аналогично, но в несколько большей степени уменьшается $\operatorname{tg}\delta$.

Уменьшение емкости со временем (электрическое старение) наиболее заметно, если образцы выдерживаются при температуре немного ниже точки Кюри. Старения практически не наблюдается при температурах, далеких от точки Кюри, а также у материалов, отличающихся малой зависимостью $\varepsilon$ от температуры.

Процесс старения сегнетоэлектриков, по-видимому, связан с изменением ориентации доменов, приводящим к некоторой взаимной компенсации их электрических моментов. В результате этого суммарный электрический момент (при той же малой напряженности внешнего электрического поля) оказывается меньшим, чем у сегнетоэлектрика, не подвергавшегося старению. Однако положение точки Кюри для образца до и после старения остается неизменным.

Электрическое старение сегнетоэлектриков — процесс обратимый. Состарившийся образец может быть восстановлен действием электрического поля или прогревом при температуре, несколько превышающей точку Кюри. Если состарившиеся в нормальных условиях конденсаторы из материала Т-7500 прогреть при температуре 100—150° С, то емкость их возрастет до 100—120% первоначального значения. В дальнейшем, если образцы остаются при комнатной температуре, емкость их снова снижается. Увеличение срока и температуры прогрева приводит к замедлению снижения емкости.

Когда образцы подвергаются термообработке при температуре выше точки Кюри в течение длительного срока и только на короткие промежутки времени охлаждаются до 20° С, изменения емкости не наблюдается. Таким образом, если рабочая температура сегнетокерамических конденсаторов выше точки Кюри, то уменьшения емкости со временем не происходит.

Воздействие сильного электрического поля разрушает взаимную связь доменов, и состарившийся образец восста-

навливается. Так, например, к конденсаторам из материала Т-7500, которые спустя некоторое время после изготовления показали снижение диэлектрической проницаемости на 30%, было приложено кратковременно постоянное поле с напряженностью 2—4 *кв/см*. Оно оказалось достаточным для того, чтобы емкость образцов вернулась к первоначальному значению. Но после отключения напряжения при хранении образцов в комнатных условиях емкость их снова снизилась до прежней величины.

Процесс старения замедляется или совершенно не наблюдается, если материал находится под воздействием поля звуковой частоты. При эксплуатации конденсаторов постоянное поле с напряженностью 2—4 *кв/см* и выше или переменное поле звуковой частоты с напряженностью свыше 2 *кв/см* полностью приостанавливает процесс старения.

Электрическое старение сегнетоэлектриков необходимо учитывать во всех случаях эксплуатации этих материалов.

## Материал ВК-1 и нелинейные свойства сегнетоэлектриков

Материал ВК-1 является керамическим сегнетоэлектриком с резко выраженными нелинейными свойствами. Сегнетоэлектрические свойства он сохраняет в широком интервале от точки Кюри (+80° С) до больших отрицательных температур. В области слабых полей с напряженностью около 10 *в/см* диэлектрическая проницаемость ВК-1 очень сильно зависит от температуры (см. рис. 5). Она составляет при комнатной температуре 2 000, в точке Кюри—около 18 000, при минус 60° С — около 1 000.

Степень нелинейности различных сегнетоэлектриков неодинакова. Для некоторых материалов она заметно проявляется в области слабых полей, для других—при достаточно высоких напряженностях поля.

Для оценки нелинейных свойств сегнетоэлектриков вводится ряд параметров. К ним относятся напряженность переменного поля $E_{макс}$, при которой обнаруживается изменение наклона кривой $P=f\ (E_{\sim})$, а диэлектрическая проницаемость достигает максимального значения, равного $\varepsilon_{макс}$, и коэффициент нелинейности $K$, показывающий, во сколько раз увеличивается диэлектрическая проницаемость относительно своего начального значения $\varepsilon_{нач}$:

$$K = \frac{\varepsilon_{макс}}{\varepsilon_{нач}}.$$

У одних сегнетоэлектриков величина $E_{макс}$ не превышает нескольких сотен вольт на сантиметр, а для других материалов она значительно выше. Встречаются материалы, у которых ε достигает максимума в области слабых полей, но изменение диэлектрической проницаемости от начального до максимального значения невелико, т. е. коэффициент нелинейности невысок. Однако только сочетание большого коэффициента нелинейности $K$ и малого значения $E_{макс}$ характеризует сегнетоэлектрик с высокими нелинейными свойстави по переменному полю.

Нелинейность сегнетоэлектриков определяется еще наклоном реверсивной характеристики диэлектрической проницаемости $\varepsilon = f(E_=)$. Под реверсивной диэлектрической проницаемостью понимают величину ε, измеренную в слабом переменном поле при наличии постоянного смещающего напряжения. Увеличение смещающего напряжения снижает ε у всех сегнетоэлектриков. Наклон реверсивной характеристики для материалов с высокой нелинейностью значителен; при соответствующем выборе переменного и постоянного напряжений ε может изменяться в несколько раз. Для материалов со слабо выраженными нелинейными свойствами реверсивная ε меняется мало.

Из известных в настоящее время сегнетоэлектриков наиболее высокие нелинейные свойства в области слабых полей обнаруживает сегнетова соль (рис. 7). Ее диэлектрическая

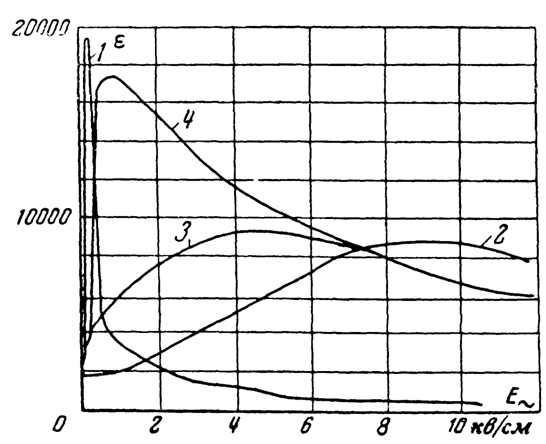



Рис. 7. Зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков от напряженности магнитного поля при комнатной температуре.
1 — сегнетовая соль; 2—титанат бария; 3—материал Т-7500; 4—материал ВК-1.

проницаемость меняется более чем в 20 раз при изменении напряженности поля от начального до максимального значения (от единиц до сотен вольт на сантиметр). При этом обычно $E_{макс}$ не превосходит 100 *в/см* и диэлектрическая проницаемость достигает максимального значения, близкого к 20 000. Однако сегнетоэлектрические свойства и высокая нелинейность сегнетовой соли сохраняются в сравнительно узком интервале температур между верхней и нижней точками Кюри. Нелинейные свойства сегнетовой соли сильно зависят даже от незначительных механических воздействий. Все это резко ограничивает использование сегнетовой соли для нелинейных элементов.

Значительно более высокой механической прочностью, чем сегнетова соль, отличаются керамические материалы. Их сегнетоэлектрические свойства проявляются в широком интервале температур. Составы керамических сегнетоэлектриков различны, и поэтому свойства их чрезвычайно разнообразны.

У одних керамических сегнетоэлектриков имеется сильная зависимость ε от температуры с наличием острого максимума, а у других эта зависимость слаба и максимум тупой. При одной и той же напряженности поля у разных материалов нелинейность проявляется по-разному. Обычно чем более резко выражена температурная зависимость ε, тем сильнее проявляются нелинейные свойства.

Материал Т-1700 по нелинейным свойствам практически не отличается от титаната бария, а материал СМ-1 почти не обнаруживает нелинейных свойств: его диэлектрическая проницаемость не меняется заметно от воздействия постоянного и переменного полей. Поэтому в дальнейшем будут рассмотрены нелинейные свойства титаната бария, а также материалов Т-7500 и ВК-1.

На рис. 7 представлена зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности переменного поля при комнатной температуре для сегнетовой соли, титаната бария и материалов Т-7500 и ВК-1. Эта зависимость для всех материалов имеет один и тот же характер. С увеличением напряженности поля диэлектрическая проницаемость растет, достигает максимума, а затем снижается. Крутизна наклона кривой у разных материалов различна.

Начальное значение диэлектрической проницаемости титаната бария около 1 500—2 000, а при напряженности поля 8 — 10 *кв/см* ε возрастает до максимального значения, равного 8 000 — 10 000. Из сопоставления зависимостей $\varepsilon = f(E_{\sim})$

в области слабых полей для сегнетовой соли и титаната бария (рис. 7) легко видеть, что изменение диэлектрической проницаемости для сегнетовой соли проявляется значительно более резко, чем для титаната бария, а величина $E_{макс}$ для титаната бария во много раз больше, чем для сегнетовой соли. Диэлектрическая проницаемость титаната бария при увеличении напряженности поля до $E_{макс}$ изменяется не более чем в 4—5 раз. Высокое значение $E_{макс}$ для титаната бария затрудняет его использование в устройствах, работающих длительное время.

Нелинейные свойства материала Т-7500 проявляются несколько иначе. Диэлектрическая проницаемость у него достигает максимального значения при $E_{макс} = 4 \div 5$ *кв/см*. Однако отношение наибольшего значения $\varepsilon_{макс}$ к начальному, измеренному при $E = 10$ *в/мм*, в нормальных условиях не превосходит 2—2,5. Это связано с тем, что точка Кюри материала Т-7500 близка к комнатной температуре (36—40° С) и начальное значение диэлектрической проницаемости, даже в области слабых полей, достаточно велико (около 3 000—5 000). Предельные значения $\varepsilon$, полученные как за счет увеличения температуры до точки Кюри, так и за счет увеличения напряженности поля до $E_{макс}$, не превышают 7 000—8 000. Они обеспечиваются лишь при применении чистого сырья.

В сегнетокерамике Т-7500 резко выражено явление старения. Нелинейные свойства материала Т-7500 также не остаются постоянными во времени. При старении величина $E_{макс}$ значительно возрастает, а диэлектрическая проницаемость в максимуме уменьшается.

Реверсивные характеристики для материала Т-7500 со временем также изменяются: их наклон уменьшается и максимум делается размытым (рис. 8).

Сравнительно низкая нелинейность и заметное старение материала Т-7500 ограничивают его применение для создания нелинейных элементов.

Диэлектрическая проницаемость материала ВК-1 резко изменяется в области слабых переменных полей и при напряженности поля около 1 000—1 500 *в/см* достигает максимального значения. По форме кривой $\varepsilon = f\ (E_{\sim})$ материал ВК-1 весьма похож на сегнетову соль, но заметно отличается от материала Т-7500 и титаната бария.

При увеличении напряженности переменного поля от начального значения 10 *в/мм* до $E_{макс}$ диэлектрическая проницаемость материала ВК-1 возрастает более чем в 6 раз и достигает в максимуме 15 000—20 000.

У нелинейных элементов серийного выпуска из материала ВК-1 начальное и максимальное значения диэлектрической проницаемости снижаются, однако коэффициент нелинейности получается не менее 4—5.

Кривые зависимости заряда на обкладках конденсатора от напряженности поля также подтверждают высокие нелинейные свойства материала ВК-1. При $E = 5$ *кв/см* для

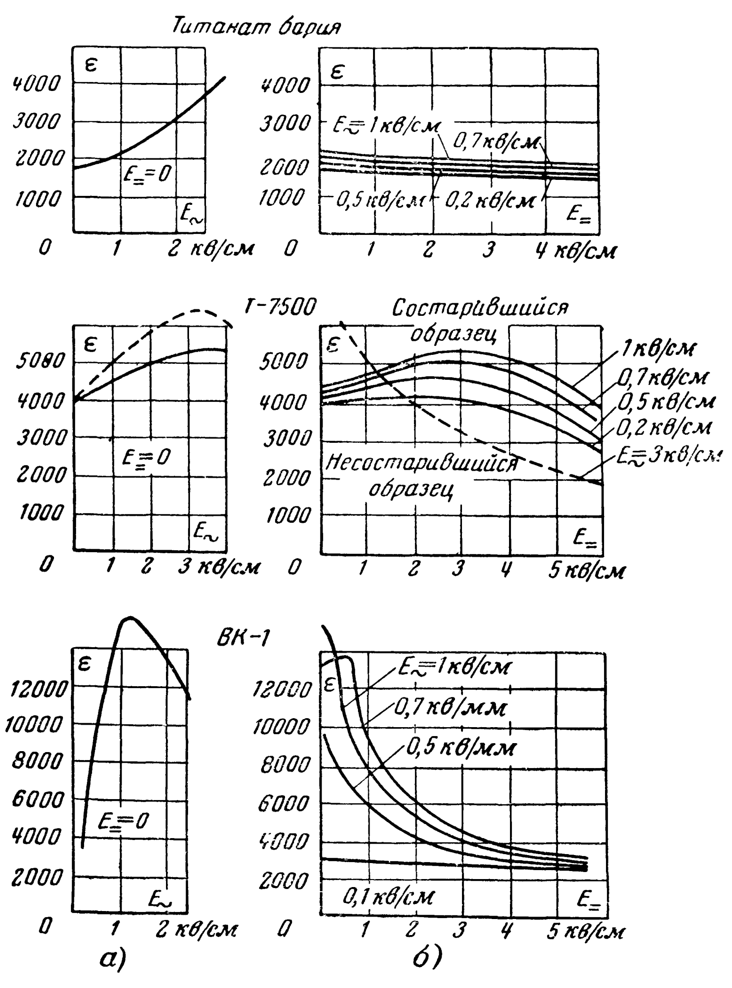



Рис. 8. Зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария и материалов Т-7500 и ВК-1 от напряженности переменного (*а*) и постоянного (*б*) полей.

титаната бария и материала Т-7500 в этих кривых едва намечается отклонение от линейности, а для материала ВК-1 уже выявляется достаточно четко эффект насыщения.

Реверсивная характеристика сегнетоэлектриков $\varepsilon=f\,(E_{=})$ очень важна при выборе материала для изготовления нелинейных элементов. Для сегнетоэлектриков, у которых $\varepsilon$ слабо зависит от величины переменного напряжения, например для титаната бария, обнаружено также незначительное влияние этого напряжения на наклон реверсивных характеристик. А для материала ВК-1 зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности постоянного поля в большой степени определяется величиной переменного напряжения. Наибольшая крутизна реверсивной характеристики получается при переменном напряжении, соответствующем напряженности поля $E_{макс}$, т. е. когда имеется максимальное значение диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{макс}$ в кривой $\varepsilon=f\,(E_{\sim})$. При более низких и более высоких напряженностях поля крутизна реверсивной характеристики падает. Эффективное регулирование наклона реверсивной характеристики воздействием переменного напряжения стало возможным только после создания сегнетоэлектриков с резко выраженной зависимостью диэлектрической проницаемости от переменного напряжения.

На рис. 8 представлены зависимости диэлектрической проницаемости от напряженности переменного и постоянного полей для титаната бария и материалов Т-7500 и ВК-1. Их сопоставление наглядно подчеркивает высокую нелинейность материала ВК-1.

Реверсивная диэлектрическая проницаемость титаната бария в области слабого переменного поля ($E$ порядка нескольких десятков вольт на сантиметр) при увеличении напряженности постоянного поля от нуля до 4—5 *кв/см* изменяется мало. Так как начальный наклон характеристики $\varepsilon=f\,(E_{\sim})$ для титаната бария незначителен, увеличение напряженности переменного поля до 1—2 *кв/см* не приводит к заметному повышению крутизны реверсивной зависимости; реверсивная $\varepsilon$ изменяется не более чем на 3—15% при увеличении напряженности постоянного поля до 4—5 *кв/см*. Только при напряженности переменного поля, близкой к $E_{макс}$, наклон реверсивной характеристики становится наиболее крутым; при увеличении постоянного поля $\varepsilon$ снижается в 4—5 раз. Величина $E_{макс}$ для титаната бария достаточно высока, что приводит к чрезмерному нагреву диэлектрика в устройствах, работающих в течение длитель-

ного времени. Поэтому использование титаната бария в нелинейных элементах чрезвычайно затруднено.

Материал ВК-1 обнаруживает значительное изменение реверсивной диэлектрической проницаемости в области слабых переменных полей. При напряженности переменного поля, соответствующей $E_{макс}$, реверсивная диэлектрическая проницаемость ВК-1 снижается в 4—5 раз, если напряженность постоянного поля меняется от нуля до 2—4 *кв/см*. Дальнейшее увеличение напряженности постоянного поля не вызывает значительных дополнительных изменений диэлектрической проницаемости. Увеличение или уменьшение напряженности переменного поля от значения $E_{макс}$ приводит к уменьшению наклона реверсивной характеристики.

Если нелинейные элементы изготовлять из материала ВК-1 в виде тонкостенных дисков или трубочек толщиной 0,1—0,5 *мм*, то переменное напряжение, обеспечивающее достаточно высокую крутизну реверсивной характеристики, будет составлять десятки и даже единицы вольт.

Таким образом, материал ВК-1 обнаруживает значительное изменение диэлектрической проницаемости при воздействии слабых переменного и постоянного полей. По нелинейным свойствам он значительно превосходит титанат бария и не уступает последнему по электрическим характеристикам (электрическая прочность, сопротивление изоляции и др.) и механическим свойствам. Технология изготовления материала ВК-1 проста; для массового производства из него нелинейных элементов применяется оборудование, принятое при оформлении непластичных керамических изделий.

Зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности поля приводит к искажению формы кривой тока, проходящего через сегнетоэлектрик. В контуре, содержащем последовательно включенные источник синусоидального напряжения, активное сопротивление и конденсатор с сегнетоэлектриком, появляются высшие гармоники; их количество и амплитуда тем больше, чем выше нелинейность сегнетоэлектрика. Искажение формы кривой тока можно оценить отношением третьей гармоники к первой. Для конденсаторов из материала ВК-1 это отношение при напряженности поля 150—350 *в/мм* составляет около 0,5 и сохраняется примерно одинаковым в интервале температур от 60 до —60° С. Отношение пятой, седьмой и более высоких гармоник к первой гармонике при соответствующем выборе напряженности

переменного поля может быть также значительным ($I_5/I_1 \approx \approx 0,35$ и $I_7/I_1 \approx 0,25$).

Специальными исследованиями было установлено, что нелинейные свойства материала ВК-1, вызванные воздействием постоянного напряжения, сохраняются достаточно высокими при увеличении частоты до десятков и сотен мегагерц. В области высоких частот материал ВК-1 можно использовать только при сравнительно слабом переменном поле, так как вследствие увеличения диэлектрических потерь при повышенной напряженности поля образцы перегреваются и их температура может превысить точку Кюри. Тогда нелинейные свойства у них заметно снизятся или вовсе исчезнут. При небольших напряженностях поля высокой частоты можно в значительных пределах управлять диэлектрической проницаемостью материала путем изменения напряженности приложенного постоянного поля. В нормальных условиях сравнительно легко получается изменение $\varepsilon$ на 10—15%. Изменение $\varepsilon$ в 3—4 раза получается проще всего при нагреве конденсатора до температуры, близкой к точке Кюри.

Менять крутизну реверсивной диэлектрической проницаемости в области высоких частот за счет величины переменного напряжения можно лишь в ограниченных пределах.

## Нелинейные свойства материала ВК-1 при различных температурах

Использование нелинейных элементов в ряде устройств возможно при условии, если их нелинейные свойства сохраняются в широком интервале температур.

Известно, что диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков сильно зависит от температуры, особенно вблизи точки Кюри. Эти изменения $\varepsilon$ наиболее значительны при действии на сегнетоэлектрик слабого переменного поля. В области сильного переменного поля зависимость $\varepsilon$ от температуры у всех сегнеэлектриков выражена менее резко.

Значительное различие характера температурной зависимости диэлектрической проницаемости в слабых и сильных полях обнаруживает материал ВК-1. На рис. 9 представлены зависимости $\varepsilon$ от температуры $t$ для ВК-1 и титаната бария при разных значениях напряженности поля.

В области слабых полей ($E_{\sim} \approx 10$ *в/мм*) с увеличением температуры от —100 до +80° С наблюдается непрерывное возрастание диэлектрической проницаемости материала ВК-1, причем она увеличивается в несколько десятков раз

(кривая *3*). Точка Кюри у материала ВК-1 — около 80° С. При этой температуре ε достигает максимального значения, равного 18 000—20 000; при дальнейшем нагревании ε снижается. При напряженности поля около 200 *в/мм* диэлектрическая проницаемость в широком интервале температур сохраняет высокие значения и меняется мало (кривая *4*).

Среднее значение диэлектрической проницаемости при $E_{\sim}$ = 200 *в/мм* близко к 16 000. Такое высокое значение ε с отклонением не более ±20% сохраняется у материала ВК-1 в интервале температур от 80 до — 60° С.

Чтобы уменьшить зависимость диэлектрической проницаемости от температуры у титаната бария, необходимо повысить напряженность переменного поля примерно до 600 *в/мм*. Среднее значение ε при этом составляет около 5 000—6 000 и остается высоким в интервале температур от 120 до —180° С.

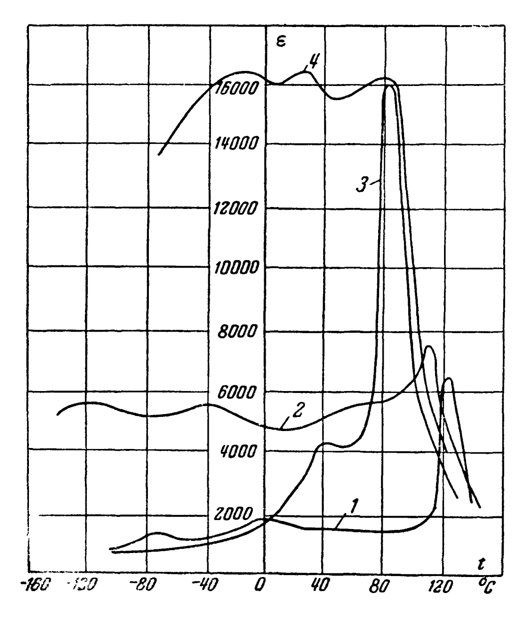



Рис. 9. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария и материала ВК-1 при разных значениях напряженности поля.

Кривые *1* и *2* — для титаната бария при $E_{\sim}$, равной соответственно 10 и 600 *в/мм*; кривые *3* и *4* — для материала ВК-1 при $E_{\sim}$, равной соответственно 10 и 200 *в/мм*.

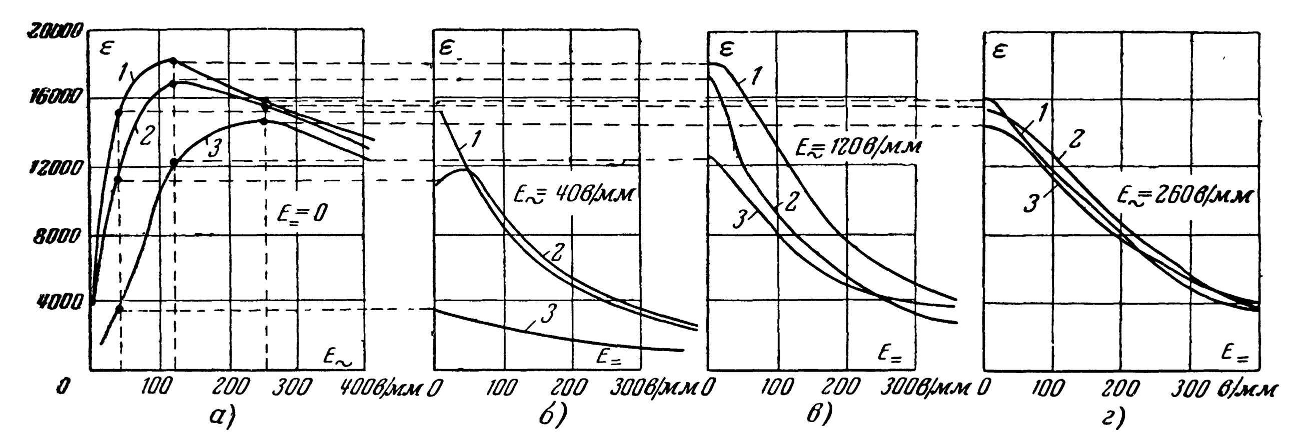



Рис. 10. Зависимость диэлектрической проницаемости материала ВК-1 от напряженности переменного и постоянного полей при разных температурах.

Кривые *1* — при температуре 60° С; кривые *2*—при 20° С; кривые *3*—при—60° С.

Материал ВК-1, так же как титанат бария, является сегнетоэлектриком в широкой области температур — от точки Кюри до низких отрицательных значений (измерения выполнены до —195°С) и обнаруживает при этом высокие нелинейные свойства.

На рис. 10 представлены зависимости $\varepsilon=f\ (E_{\sim})$ для материала ВК-1, измеренные при температурах 60, 20 и —60° С. Во всех случаях диэлектрическая проницаемость сильно зависит от напряженности поля, причем $E_{макс}$ для всех трех температур не превышает 250 *в/мм*. Начальная диэлектрическая проницаемость при отрицательных температурах много ниже, чем при положительных, а максимальные значения $\varepsilon$ почти одинаковы в интервале температур от 60 до —60° С. Поэтому коэффициент нелинейности $K=\varepsilon_{макс}/\varepsilon_{нач}$ значительно выше для отрицательных температур, нежели для положительных.

Наличие высоких нелинейных свойств у материала ВК-1 в широком интервале температур позволяет изготовлять из него нелинейные элементы для устройств, рабочая температура которых меняется в широких пределах.

Когда напряженность переменного поля меньше $\underset{\sim}{E}_{макс}$ (например, 40 *в/мм*), диэлектрическая проницаемость и наклон реверсивных характеристик у материала ВК-1 имеют различные значения при отрицательных и положительных температурах (рис. 10,*б*). Если же напряженность переменного поля выбрана достаточно большой (например, 120 или 260 *в/мм*), то значения диэлектрической проницаемости и наклона реверсивных характеристик при температурах 60, 20 и —60° С незначительно отличаются друг от друга (рис. 10,*в* и *г*).

Таким образом, при напряженности переменного поля около 200 *в/мм* нелинейные элементы из материала ВК-1 имеют реверсивные характеристики, мало меняющиеся в широком интервале температур.

За рубежом для нелинейных конденсаторов применяется материал аэровакс с точкой Кюри около комнатной температуры и максимальным значением $\varepsilon$ порядка 7 000. При увеличении напряженности постоянного поля от нуля до 4 *кв/мм* у этого материала $\varepsilon$ снижается в 4—5 раз. Изменение температуры в обе стороны от точки Кюри уменьшает диэлектрическую проницаемость и наклон реверсивной характеристики. По сравнению с материалом ВК-1 преимущество аэровакса заключается в том, что вблизи комнатной температуры он дает более значительное изменение $\varepsilon$ в области

слабого переменного поля и имеет более низкие диэлектрические потери. Однако у него область рабочих температур меньше и ε значительно слабее зависит от величины переменного напряжения, чем у материала ВК-1.

Недавно в СССР разработан материал ВК-3 с точкой Кюри около 20° С, имеющий очень высокие нелинейные свойства. У него диэлектрическая проницаемость в максимуме более 20 000 при $E_{\sim}=40$ *в/мм* и $E_{=}=0$, а увеличение напряженности постоянного поля до 600 *в/мм* снижает ε до 4 000—3 000. Этот материал, так же как и аэровакс, может служить для изготовления нелинейных элементов, работающих при комнатной температуре, и характеризуется более низкими диэлектрическими потерями, чем материал ВК-1.

## *ГЛАВА ТРЕТЬЯ*

# ВАРИКОНДЫ

### Основные типы варикондов

Вариконды находят разнообразное применение в качестве нелинейных элементов электрической цепи в области как низких, так и высоких частот.

В соответствии с разнообразием режимов их использования вариконды изготовляются различных типов и различаются размерами, конструкцией и номинальным значением емкости. Обычно они изготовляются в виде дисков диаметром 1,6—25 *мм* и толщиной 0,3—0,6 *мм*.

Основные данные выпускаемых в настоящее время варикондов из материала ВК-1 приводятся в таблице.

**Вариконды из материала ВК-1**

| Вид вариконда | Номинальная емкость | Диаметр диска *D*, *мм* | Вес, *г* | Рабочее напряжение, *в* | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | постоянный ток | ток с частотой 50 *гц* |
| ВК1-0 | 100 *пф* | 2 | 0,1 | 250 | 160 |
| ВК1-1 | 510 и 1 500 *пф* | 4 | 0,4 | 250 | 160 |
| ВК1-2 | 2 700 и 5 100 *пф* | 9 | 0,7 | 250 | 160 |
| ВК1-3 | 6 800 и 12 000 *пф* | 16 | 1,2 | 250 | 160 |
| ВК1-Б | 0,15 и 0,2 *мкф* | 25 | 20 | 300 | 160 |

Номинальное значение емкости варикондов определяется при напряжении 5 *в* и частоте 50 *гц*. Вследствие высокого значения диэлектрической проницаемости материала ВК-1 при серийном производстве варикондов одного типа наблюдается значительный разброс емкости. Допуск по номинальному значению емкости варикондов установлен от +100 до —40%.

Емкость варикондов при увеличении переменного напряжения возрастает, достигает максимума и затем снижается.

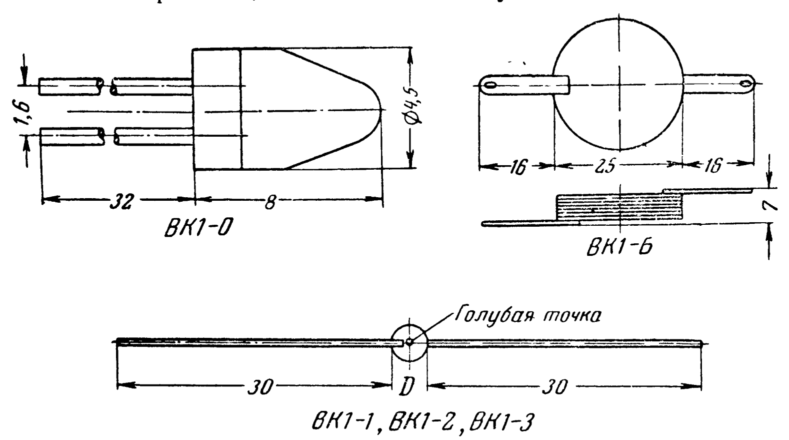



Рис. 11. Конструкции варикондов.

Напряжение, при котором емкость достигает максимального значения, обозначают $U_{макс}$. Для варикондов из материала ВК-1 оно не превышает 80—150 *в*. Отношение Максимального значения емкости к номинальному, равное коэффициенту нелинейности *К*, для этих варикондов получается не менее 4, а отношение емкости, измеренной при 30 *в*, к номинальному значению — не менее 2.

Материал ВК-1 отличается высоким удельным сопротивлением. Сопротивление изоляции в нормальных условиях для всех варикондов из этого материала, кроме ВК1-Б, не менее 10 000 *Мом;* для блоков ВК1-Б оно не менее 1 000 *Мом.*

Конструкции варикондов из материала ВК-1 представлены на рис. 11. Вариконд ВК1-0 имеет керамический диск диаметром 1,6 *мм* и толщиной 0,4 *мм.* Металлические выводы у него закреплены в пластмассовом основании. Вариконды ВК1-1, ВК1-2 и ВК1-3 выпускаются каждый на два различных значения емкости. Они изготовляются в ви-

де плоских дисков, имеющих толщину не более 0,5 *мм* для ВК1-1 и не более 0,6 *мм* для ВК1-2 и ВК1-3. Максимальную емкость имеет вариконд ВК1-Б, собранный из отдельных дисковых элементов ВК1-4 толщиной 0,6 *мм.*

Электроды на поверхность керамических пластин наносятся в форме эллипса. Готовый вариконд покрывается красным эмаль-лаком, а для отличия от других сегнетокерамических конденсаторов ставится голубая точка.

Работа варикондов возможна при относительной влажности воздуха до 98% и температуре окружающей среды от —40 до 60° С (для блока ВК1-Б от —40 до 50° С).

Кривая зависимости емкости от переменного напряжения для всех типов варикондов из материала ВК-1 имеет один и тот же характер. Восходящий участок весьма близок

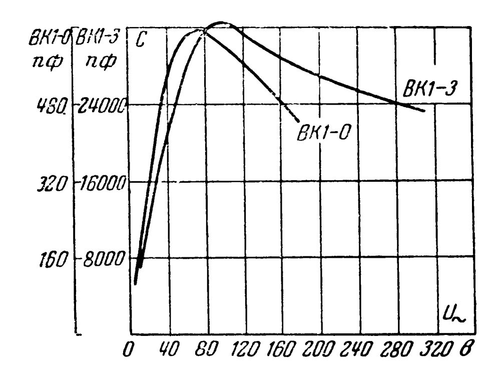



Рис. 12. Зависимость емкости варикондов ВК1-0 и ВК1-3 от переменного напряжения.

к линейному, а падающий более пологий и заметно отличается от линейного. На рис. 12 в качестве примера даны эти кривые для образцов варикондов ВК1-0 и ВК1-3. Как видно, у них при увеличении напряжения от 5 до 70 *в* емкость возрастает соответственно от 100 до 580 и от 6 800 до 30 000 *пф*. Для варикондов ВК1-1 и ВК1-2 при таком же увеличении напряжения емкость возрастает в 4—6 раз.

Для двух групп образцов варикондов ВК1-Б зависимость емкости от переменного напряжения представлена на рис. 13. При напряжении 100—120 *в* емкость достигает значения 0,6—1 *мкф*.

Наличие максимума в кривой $C=f(U_{\sim})$ вызывает появление участка насыщения в кривой зависимости тока от напряжения для цепи, содержащей вариконд. На рис. 14 приведе-

ны волт-амперные характеристики для блока ВК1-Б, собранного из девяти или 11 элементов ВК1-4. Для отдельных элементов сохраняется один и тот же характер кривых, снятых при температурах 60, 20 и —60° С. На начальном участке кривой $I=f\ (U_{\sim})$ наблюдается рост тока, затем при частоте 50 *гц* и при напряжении около 150—200 *в* наступает насыщение. При частоте 400 *гц* ток в режиме насыщения составляет 300—320 *ма*. Вид вольт-амперных характеристик

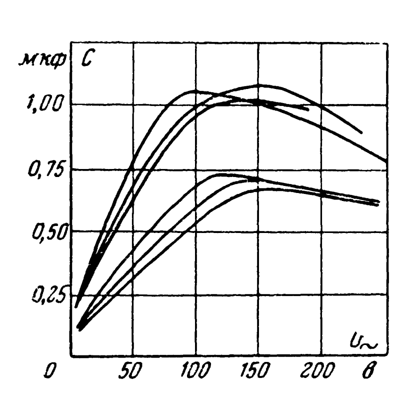



Рис. 13. Зависимость емкости образцов варикондов ВК1-Б при температуре 20° С от переменного напряжения с частотой 50 *гц*.

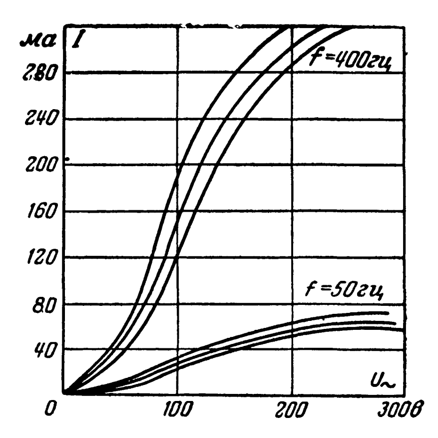



Рис. 14. Вольт-амперные характеристики образцов варикондов ВК1-Б при частотах 50 и 400 *гц* и температуре 20° С.

мало меняется при изменении температуры от 50 до —40° С. В области отрицательных температур насыщение наступает несколько позже, чем в случае положительных.

Воздействием постоянного напряжения можно в значительных пределах управлять величиной тока. Этот эффект наиболее резко проявляется при переменном напряжении, соответствующем насыщению.

По мере увеличения постоянного напряжения ток уменьшается. В кривой $I=f\ (U_{=})$ можно выделить три участка: на первом ток незначительно падает, на втором он уменьшается более резко, а на третьем, соответствующем напряжениям выше 200—300 *в*, он достигает предельного значения (рис. 15).

Если переменное напряжение равно или больше $U_{макс}$, то реверсивные вольт-амперные характеристики остаются почти одинаковыми в интервале температур от —40 до 50° С.

Отношение начального тока (при отсутствии постоянного напряжения) к предельному (при $U_{=} = 250$ *в*) равняется 4—6. Если переменное напряжение меньше $U_{макс}$ (например, 75 *в*), то степень управления током значительно снижается При этом ток и крутизна характеристики заметно зависят от температуры.

Как уже указывалось, температурный коэффициент емкости варикондов в широком интервале температур не

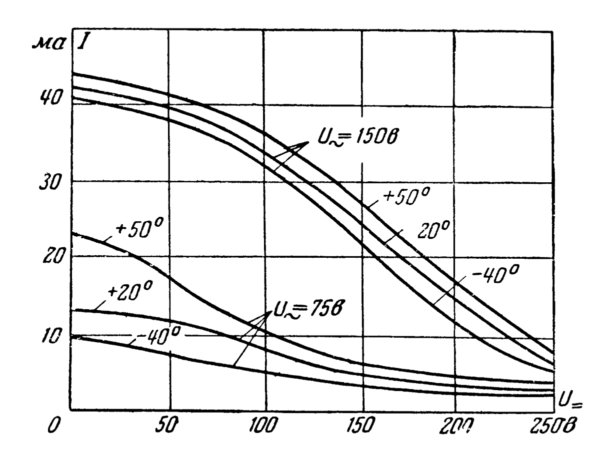



Рис. 15 Реверсивные вольт-амперные характеристики блоков ВК1-Б при частоте 50 *гц* для различных значений температуры и переменного напряжения.

остается постоянным, а зависит от напряженностей переменного и постоянного полей. Однако для каждого типа вариконда можно выбрать такое значение переменного напряжения, при котором емкость в широком интервале температур меняется незначительно. Например, для вариконда ВК1-0 при напряжении 30 *в* среднее значение емкости составляет 580 *пф* ±20% в интервале температур от —30 до 80° С. При напряжении 5 *в* и изменении температуры от —40 до 60° С емкость образца вариконда ВК1-1 возрастает примерно в 6 раз, а при напряжении 30 *в* в этом же интервале температур емкость изменяется не более чем на ±20%.

Если переменное напряжение выбрано таким, что емкость мало зависит от температуры, то в этом режиме значения крутизны реверсивных характеристик емкости и тока остаются постоянными в широком интервале температур. Это позволяет получать стабильными параметры

устройств, построенных на варикондах. Например, коэффициент усиления диэлектрического усилителя или девиация частоты частотного модулятора будут оставаться постоянными при изменениях температуры в больших пределах.

Рассмотренные типы варикондов далеко не полностью удовлетворяют разнообразным требованиям, предъявляемым к нелинейным сегнетокерамическим элементам. Поэтому проводятся исследования по созданию новых конструкций варикондов.

## Новые конструкции варикондов

Область применения варикондов непрерывно расширяется. В связи с этим возникает необходимость создания новых конструкций варикондов и новых материалов для них.

Наиболее существенными требованиями к новым сегнетокерамическим материалам являются снижение диэлектрических потерь, повышение стабильности и нелинейности. Новые конструкции варикондов должны иметь повышенные механическую прочность и влагостойкость, широкий диапазон номинальных значений емкости (от единиц и десятков пикофарад до единиц и десятков микрофарад), должны быть пригодны для использования в области очень слабых полей и при повышенных значениях напряженности поля. Для выполнения этих требований в последнее время были разработаны новые конструкции варикондов.

Специально для дециметрового и сантиметрового диапазонов волн разработана конструкция так называемых четырехэлектродных варикондов с очень малой емкостью, которая может управляться с помощью сравнительно слабого поля. Эти вариконды имеют вид параллелепипедов. Электроды у них расположены взаимно-перпендикулярно на четырех гранях.

Если образцы имеют форму тонкого и высокого бруска, то емкость будет малой для пары электродов с малой площадью и большим между ними расстоянием. Толщина образца для управляющего поля выбирается небольшой, и тогда для получения заметного изменения емкости управляющее поле достаточно изменять в небольших пределах. На рис. 16 представлены схема включения четырехэлектродного образца и графики зависимости его емкости от переменного и постоянного напряжений.

Постоянное управляющее напряжение $U_=$ подается к электродам, близко расположенным друг к другу. Переменное напряжение несущей частоты подводится к двум

другим электродам. Емкость вариконда в этом случае может быть всего лишь порядка единиц пикофарад. При изменении управляющего напряжения от нуля до десятков вольт емкость изменяется в несколько раз.

Экспериментально установлено, что если приложить постоянное управляющее напряжение и переменное напряжение к одним и тем же обкладкам конденсатора или к разным, расположенным перпендикулярно друг другу, то при одной и той же напряженности поля эффект изменения

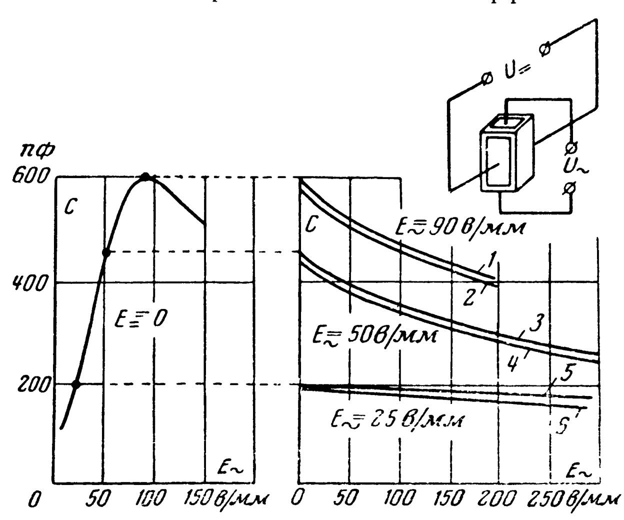



Рис. 16. Зависимость емкости четырехэлектродных варикондов от напряженности переменного и постоянного полей (для кривых *1*, *3* и *5* постоянное и переменное напряжение подано на одни и те же электроды, а для кривых *2*, *4*, *6*—на электроды, расположенные взаимно-перпендикулярно).

емкости будет одинаковым. Это наглядно подтверждают кривые на **рис. 16.**

Четырехэлектродные вариконды могут применяться и в тех случаях, когда надо разделить электрические цепи по несущей и управляющей частоте или когда емкость вариконда должна иметь разные значения для цепей основного и управляющего тока.

Выпускаются также малогабаритные вариконды типа ВК1-М (рис. 17,*а*). Среднее значение емкости у таких варикондов при напряжении 5 *в* и частоте 50 *гц* равно 12 *пф;* отношение емкостей, измеренных при напряже-

ниях 30 и 5 *в*, не менее 2. Емкость вариконда ВК1-М при напряжении около 100 *в* достигает максимального значения, равного примерно 40—50 *пф*. Эта конструкция обеспечивает получение образцов со сравнительно небольшим отклонением номинального значения емкости от ее среднего значения (крайние значения емкости составляют 6—16 *пф*).

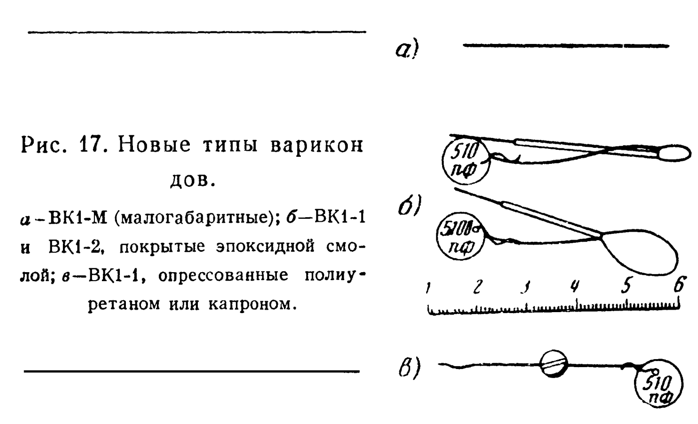



Рис. 17. Новые типы варикондов.

*а* – ВК1-М (малогабаритные); *б*—ВК1-1 и ВК1-2, покрытые эпоксидной смолой; *в*—ВК1-1, опрессованные полиуретаном или капроном.

Вариконды ВК1-М могут применяться в генераторах качающейся частоты и частотных модуляторах для диэлектрической настройки панорамных приемников, а также для других случаев в области высоких и сверхвысоких частот.

Опрессовка вариковдов новыми видами пластмасс, полиуретаном или капроном, или заливка эпоксидной смолой в значительной степени повышает механическую прочность и влагостойкость образцов. Внешний вид варикондов, покрытых эпоксидной смолой и опрессованных полиуретаном или капроном, показан на рис. 17,*б* и *в*.

Для получения значительного изменения емкости при сравнительно небольших изменениях управляющего напряжения используются так называемые пленочные вариконды. Толщина пленки сегнетокерамики у них составляет 0,2 *мм*. Если образец имеет форму диска диаметром около 9 *мм*, то его емкость при напряжении 25—30 *в* достигает максимального значения, равного 0,04—0,06 *мкф*.

На рис. 18 приведены для сравнения зависимости емкости от переменного напряжения для вариконда ВК1-2 и пленочного вариконда, имеющих форму диска одного и того же диаметра, но различающихся толщиной. Для пленочных

образцов крутизна кривой $C=f\ (E_{\sim})$ много выше, чем для обычных варикондов.

Управление емкостью пленочных конденсаторов с помощью постоянного поля может быть эффективным в области малых значений как постоянного, так и переменного напряжений. При увеличении постоянного напряжения от нуля до 40 *в* емкость пленочного вариконда изменяется более чем в 4 раза, если переменное напряжение $U_{\sim}=30$ *в*, и более чем в 2 раза, если $U_{\sim}=5$ *в*.

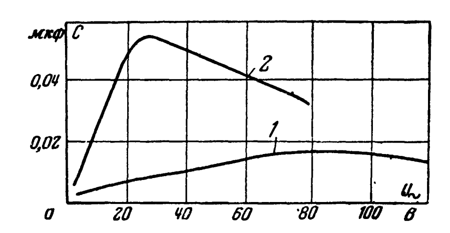



Рис. 18. Зависимость емкости от напряжения для вариконда ВК1-2 (кривая *1*) и пленочного образца (кривая *2*).

Путем комбинирования образцов из сегнетокерамических материалов с разной температурой Кюри изготовляются новые вариконды, у которых при малых переменных напряжениях емкость незначительно зависит от температуры. Они названы термокомпенсированными варикондами и имеют обозначение ВКТ.

Вариконды типа ВКТ могут служить в качестве нелинейных элементов в случае, когда переменное напряжение составляет 1—3 *в*. Изменение их емкости осуществляется, как обычно, с помощью постоянного напряжения. Высокая нелинейность варикондов этого типа сохраняется почти постоянной при изменении температуры от 50 до —50° С. Новый тип термокомпенсированных варикондов, несомненно, будет иметь широкое применение.

Для низких частот разрабатываются новые конструкции варикондов с номинальным значением емкости порядка единиц и десятков микрофарад. Чтобы можно было применять вариконды на повышенных частотах и напряжениях, необходимо создать конструкции, обеспечивающие хороший теплоотвод с поверхности и сохраняющие высокую механическую прочность и малые габариты.

*ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ*

# ПРИМЕНЕНИЕ ВАРИКОНДОВ

Исторически первым случаем использования нелинейных свойств сегнетоэлектриков является применение их для умножения частоты, предложенное В. П. Вологдиным Диэлектрический умножитель был построен на конденсаторах из сегнетовой соли и назван новым генератором повышенных и высоких частот. Он не получил применения в технике из-за низких физических и механических свойств сегнетовой соли. Однако тогда впервые была показана возможность замены электронной лампы нелинейным элементом из сегнетоэлектрика.

После установления сегнетоэлектрических свойств титаната бария Г. И. Сканави и М. Д. Нейман применили его в диэлектрическом стабилизаторе напряжения на керамических конденсаторах. Затем были разработаны схемы частотных модуляторов, а также сделаны попытки создать диэлектрический усилитель и другие устройства. Слабо выраженные нелинейные свойства титаната бария препятствовали использованию его в нелинейных конденсаторах. Он получил применение лишь для изготовления малогабаритных конденсаторов и главным образом пьезоэлементов. Высокие нелинейные свойства материала ВК-1 позволили создать новый вид нелинейных элементов — вариконды.

В последние годы рассмотрен ряд случаев применения варикондов, установлена возможность их применения в различных устройствах для замены электронных ламп и магнитных нелинейных элементов. Показано, что на варикондах различных типов могут работать диэлектрические усилители постоянного и переменного тока, умножители и делители частоты, стабилизаторы напряжения, ограничители и регуляторы сигналов, частотные модуляторы, диэлектрические фазовращатели, бесконтактные выключатели (реле), цепи формирования импульсов и многие другие устройства.

Вариконды могут использоваться в качестве сверхмалогабаритных конденсаторов, диэлектрических термометров, служить для электрической настройки колебательного контура, уменьшения вредного влияния экстратоков и создания искробезопасных систем и многих других целей.

Ниже мы остановимся на отдельных случаях применения варикондов.

## Диэлектрические усилители

Принцип действия любого усилителя (лампового, магнитного, полупроводникового или диэлектрического) состоит в том, что входной усиливаемый сигнал управляет энергией источника питания, мощность которого во много раз превосходит мощность источника усиливаемого сигнала. Для осуществления такого управления используется нелинейный элемент, эквивалентное сопротивление которого является функцией входного усиливаемого сигнала.

Нелинейными элементами в схемах усилителей служат электронные лампы, полупроводниковые приборы, магнитные нелинейные элементы и нелинейные конденсаторы из сегнетоэлектриков. Для питания электронных ламп и полупроводниковых приборов требуется постоянное напряжение. В двух других случаях нелинейные элементы являются управляемыми реактивными сопротивлениями (индуктивным и емкостным). Поэтому питание магнитного и диэлектрического усилителей осуществляется от источника переменного тока.

На рис. 19 приведены упрощенные схемы лампового, магнитного и диэлектрического усилителей, а также графики, поясняющие работу двух последних усилителей.

Принципиальная схема диэлектрического усилителя состоит из последовательно включенных нелинейного конденсатора (вариконда) $C$, к которому подводится постоянное напряжение $U_{см}$, сопротивления нагрузки $R_н$ и источника переменного напряжения $U_\sim$ (рис. 19,*в*).

Емкость вариконда зависит от приложенных переменного и постоянного напряжений. Изменяя постоянное напряжение $U_{см}$ (напряжение смещения), можно изменять емкостное сопротивление $X_C = 1/\omega C$ вариконда, а следовательно, и ток в его цепи. Затрачивая от источника смещения малую мощность благодаря очень высокому сопротивлению вариконда, можно управлять относительно большой мощностью переменного тока, протекающего через вариконд. Таким образом, в диэлектрическом усилителе напряжение усиливаемых сигналов $U_{вх}$ должно быть введено в цепь источника смещения $U_{см}$.

При этом частота источника питания $U_\sim$ должна быть много больше частоты усиливаемого сигнала (по крайней мере в 10 раз). Следовательно, в диэлектрическом усилителе управляющее напряжение от источника сигнала по существу модулирует посредством вариконда ток более высокой частоты, получаемый от источника питания.

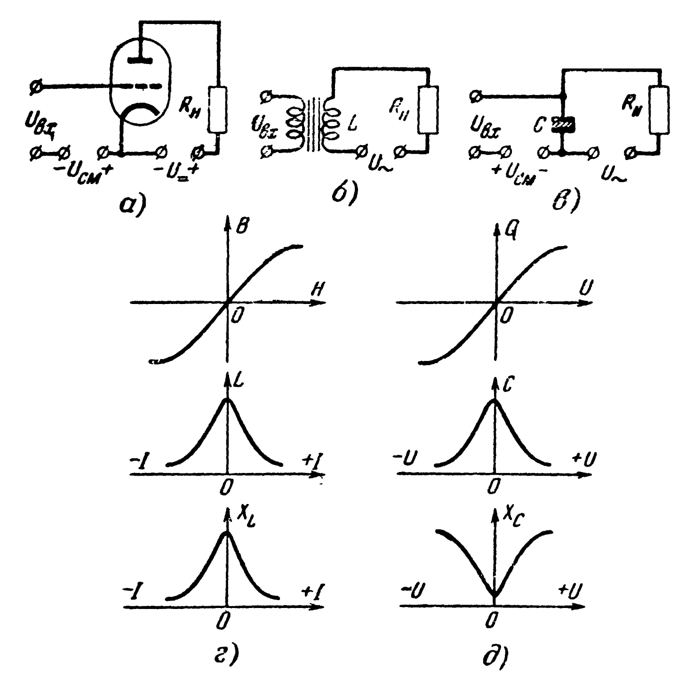



Рис. 19. Упрощенные схемы усилителей и графики, поясняющие их работу.

*а*—ламповый усилитель; *б*—магнитный усилитель; *в*—диэлектрический усилитель; *г*—график, поясняющий работу магнитного усилителя; *д*—график, поясняющий работу диэлектрического усилителя.

Если на выходе нужно получить усиленное напряжение с частотой сигнала, то применяется детектирование (выпрямление).

На рис. 20 показана практическая схема усилителя сигналов переменного тока, испытанная Л. В. Сентюриной. Напряжение сигнала $U_{вх}$ через трансформатор *Тр* подво-

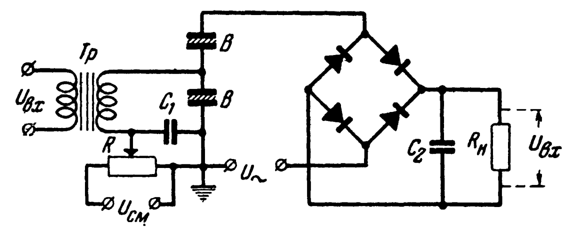



Рис. 20. Схема диэлектрического усилителя сигналов переменного тока.

дится к варикондам $B$ (обычно вариконд обозначают буквами ВК) вместе с постоянным напряжением смещения $U_{см}$. Последнее можно регулировать с помощью потенциометра $R$. Детектирование осуществляется по мостовой схеме выпрямления.

По аналогичной схеме, но только без входного трансформатора можно построить усилитель постоянного тока.

Для получения высоких коэффициентов усиления диэлектрического усилителя переменное напряжение от источника питания на вариконде должно быть близко к $U_{макс}$, а постоянное напряжение следует выбрать таким, чтобы рабочая точка соответствовала максимальной крутизне на реверсивной кривой емкости вариконда $C=f\ (U_=)$. Усиление по мощности простейшего диэлектрического усилителя зависит от частоты, а также от напряжений питания и сигнала.

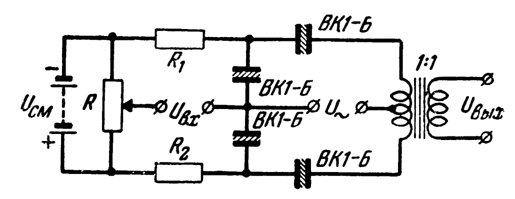



Рис. 21. Схема диэлектрического усилителя мощности для следящего привода.

Наиболее перспективным следует считать применение диэлектрических усилителей для усиления мощности постоянного тока. Входное сопротивление такого усилителя определяется сопротивлением изоляции вариконда. Оно очень велико ($10^{10}$—$10^{11}$ *ом* и выше). Поэтому коэффициент усиления по мощности при усилении слабых сигналов может достигать очень высоких значений (до десятков миллионов).

На рис. 21 приведена схема двухтактного диэлектрического усилителя мощности на четырех варикондах ВК1-Б, работающего на двигатели переменного тока в системе следящего привода (предложена Н. Л. Худобко). Вариконды в каждом плече включены последовательно по отношению к напряжению питания $U_\sim$ и параллельно по отношению к управляющему напряжению $U_{вх}$. С помощью потенциометра $R$ схема балансируется так, что при отсутствии сигнала на входе получают минимальный сигнал на выходе. Для оптимального использования нелинейных свойств варикондов напряжение смещения $U_{см}$ выбрано 240 *в* (по 120 *в* на каждый блок), а напряжение питания $U_\sim$ составляет 220 *в* при частоте 500 *гц*. Емкость блока при напряжении

100 *в* достигает максимальной величины 0,6 *мкф*. При входном напряжении 120 *в* максимальная выходная мощность составляет 24 *ва*. Коэффициент усиления по мощности этого усилителя равняется $10^6$, а коэффициент усиления по напряжению —1,4. Выходная мощность в активном сопротивлении нагрузки 1,5 *ком* составляет 10 *вт*.

Усилитель был испытан в простейшей следящей системе. Входное переменное напряжение с частотой 500 *гц* подавалось через фазочувствительный выпрямитель на вход диэлектрического усилителя мощности, нагруженного на управляющую обмотку асинхронного двухфазного двигателя типа АДП-1. Коэффициент полезного действия диэлектрического усилителя был равен 43%; постоянная времени составляла 32 *мсек*. В интервале температур от —50 до 100° С выходная мощность усилителя изменялась незначительно.

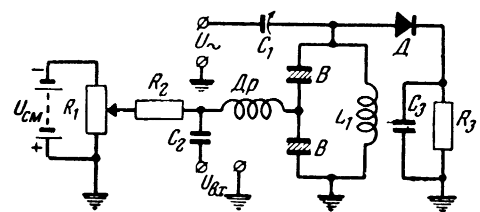



Рис. 22. Схема резонансного диэлектрического усилителя.

Для той же цели был собран диэлектрический усилитель мощности, управляемый от предварительного усилителя напряжения на полупроводниковых триодах П2А. Входное напряжение в этом случае составляло 2 *в*. С выхода предварительного усилителя напряжение порядка 90—100 *в* подавалось на диэлектрический усилитель. Сочетание полупроводникового усилителя с диэлектрическим позволяет построить безламповый малогабаритный усилитель, работающий долговечно и надежно.

Существующие типы варикондов не позволяют получить в простейших схемах коэффициент усиления по напряжению значительно больше единицы. Чтобы увеличить его, можно применить повышающий трансформатор или резонансный контур в цепях управляющего сигнала или питающего напряжения.

В случае усиления низкочастотных сигналов переменного тока и работы на высокоомное нагрузочное сопротивление удалось получить коэффициент усиления по напряжению около 6—8, причем он оставался постоянным в широком

интервале температур (от +50 до —50° С). При выборе других условий работы схемы коэффициент усиления может быть повышен до 20, однако это значение он сохраняет в ограниченном интервале температур.

Простейшая схема резонансного диэлектрического усилителя низкой частоты показана на рис. 22. Усилитель питается напряжением высокой частоты $U_{\sim}$ .

Резонансный контур состоит из последовательно соединенных подстроечного конденсатора $C_1$ и индуктивности $L_1$,

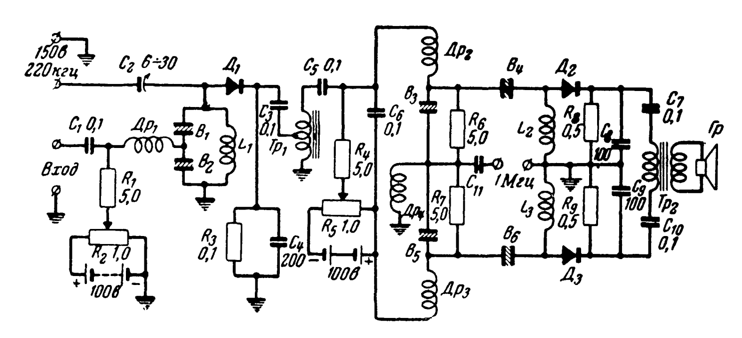



Рис. 23. Принципиальная схема двухкаскадного усилителя низкой частоты на варикондах.

параллельно которой включены два вариконда $B$. В этом контуре получается последовательный резонанс, который при сравнительно малом напряжении питания $U_{\sim}$ обеспечивает большое напряжение на варикондах. Емкость конденсатора $C_1$ (подбирается для каждой схемы опытным путем) определяет значение коэффициента усиления, а также позволяет установить собственную частоту резонансного контура выше или ниже частоты питающего напряжения. Входное напряжение низкой частоты и постоянное напряжение смещения подаются по параллельной схеме.

Чтобы получить на нагрузочном сопротивлении $R_3$ усиленное напряжение с частотой сигнала, включаются детектор $Д$ и шунтирующий конденсатор $C_3$. Они работают так же, как в обычных детекторных схемах.

Принципиальная схема двухкаскадного усилителя низкой частоты на варикондах, исследованная В. В. Гурьевым и Ю. А. Сморяковым, показана на рис. 23. Усилитель имеет коэффициент усиления по мощности 5 000. Частотная характеристика его прямолинейна в диапазоне 200—5 000 *гц*.

Первый каскад является усилителем напряжения. Вариконды $B_1$ и $B_2$ и катушка $L_1$ образуют усилительный контур.

Сигнал (от звукоснимателя) подается через разделительный высокочастотный дроссель $Др_1$, имеющий большое сопротивление для токов с частотой питания. Подбором его индуктивности можно корректировать частотную характеристику усилителя. По отношению к напряжению сигнала вариконды соединены параллельно, а по отношению к напряжению питания — последовательно, что позволяет увеличить коэффициент усиления.

Этот каскад питается от генератора высокой частоты на лампе 6П3С, дающего напряжение 150 *в* с частотой 220 *кгц*. Напряжение смещения, поданное от отдельного источника, равно 30—100 *в* (напряжение смещения можно подавать и от сопротивления нагрузки каскада $R_3$). Детектор $Д_1$ состоит из двух соединенных последовательно диодов ДГ-Ц6. Для выравнивания их обратных сопротивлений рекомендуется параллельно каждому из них включить сопротивление порядка 5 *Мом*. Связь со вторым каскадом осуществляется через повышающий автотрансформатор $Тр_1$ с коэффициентом трансформации 1 : 4.

Выходной каскад является двухтактным усилителем с выходной мощностью 0,25 *ва*. Его плечи образуются последовательными контурами $B_3$ $B_4$ $L_2$ и $B_5B_6$ $L_3$. Напряжение сигнала подается на все вариконды в одинаковой фазе. На вариконды $B_3$ и $B_4$ подается смещение одной полярности, а на $B_5$ и $B_6$ — другой. Поэтому для одного плеча напряжения сигнала и смещения складываются, а для другого — вычитаются. Это приводит к тому, что на нагрузочных сопротивлениях $R_8$ и $R_9$ усиленные напряжения находятся в противофазе без применения фазоинвертора или трансформатора со средней точкой. Можно получить тот же результат, настраивая контуры соответственно на частоты выше и ниже частоты питающего тока и подавая на оба плеча смещение одного знака. Но такой усилитель труднее настроить. Каскад питается от генератора на лампе ГУ-50, дающего напряжение с частотой 1 *Мгц*.

Существенным недостатком рассмотренной схемы надо считать питание ее от двух ламповых генераторов. Однако можно построить аналогичный усилитель на варикондах с питанием его каскадов от одного генератора высокой частоты.

Исследование различных резонансных схем диэлектрических усилителей показало, что их коэффициент усиления зависит от соотношения напряжений питания и усиливаемого сигнала, соотношения частот этих напряжений, доброт-

ности контура и крутизны реверсивной характеристики варикондов.

Модуляция напряжения высокой частоты получается тем глубже, чем больше крутизна реверсивной характеристики вариконда $C=f\ (U_=)$ и добротность контура.

Так как вместе с изменением емкости вариконда меняется и переменное напряжение в контуре, диэлектрический усилитель работает не по статической, а по динамической

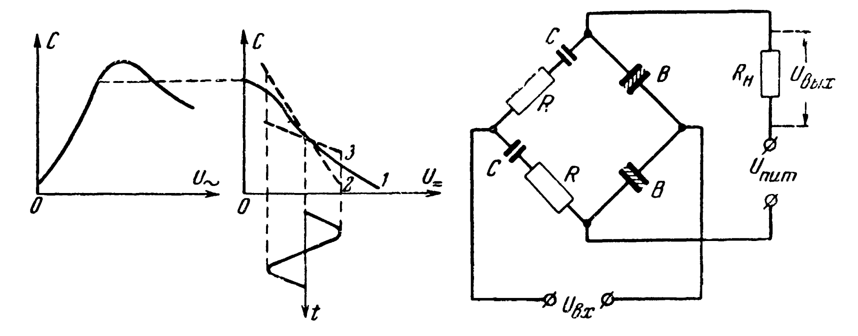



Рис. 24. Графики зависимости емкости вариконда от переменного и постоянного напряжений.
*1*—статическая; *2* и *3*—динамические реверсивные характеристики емкости.

Рис. 25. Мостовая схема диэлектрического усилителя.

реверсивной характеристике. Крутизна последней при подаче положительной или отрицательной полуволны низкочастотного управляющего напряжения может быть либо больше, либо меньше, чем крутизна статической характеристики (рис. 24). Это зависит от выбора рабочей точки на возрастающем или падающем участке кривой $C=f\ (U_\sim)$ и частоты питающего тока (выше или ниже собственной частоты резонансного контура).

Некоторое применение имеют также диэлектрические усилители по мостовой схеме (рис. 25). В них сопротивление нагрузки $R_н$ включается последовательно с источником питания $U_{пит}$ в диагональ моста, составленного из двух варикондов *В* и двух линейных конденсаторов *С*. Последовательно с линейными конденсаторами включаются балластные сопротивления. Изменение управляющего напряжения $U_{вх}$ вызывает изменение емкости варикондов и, следовательно, приводит к разбалансу моста и перераспределению напряжения источника питания между сопротивлением нагрузки и мостом.

Одним из недостатков рассмотренных диэлектрических усилителей является наличие отдельного источника постоянного смещения. Свободными от этого недостатка являются схемы диэлектрических усилителей с так называемой внутренней поляризацией. В них напряжение смещения получается за счет постоянной составляющей выходного тока.

Схема усилителя с внутренней поляризацией, разработанного Ю. С. Волковым, представлена на рис. 26. Выходная цепь усилителя разделена для постоянного и переменного токов. Поэтому на дросселе $Др_2$ получается переменное напряжение, а на сопротивлении $R_2$, шунтированном

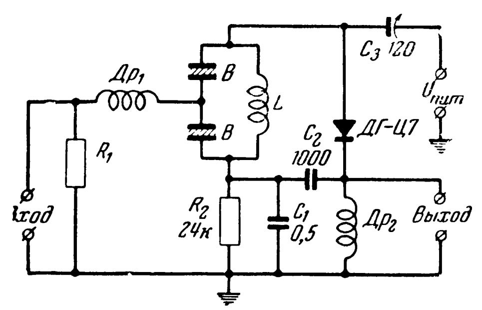



Рис. 26. Схема диэлектрического усилителя с внутренней поляризацией.

конденсатором $C_1$ — постоянное напряжение, которое через входное сопротивление $R_1$ подается как смещение на вариконды $B$.

Поляризация нелинейных элементов за счет постоянной составляющей выходного тока является по существу отрицательной обратной связью, стабилизирующей режим работы каскада при случайных изменениях температуры, а также напряжения и частоты источника питания.

Рассмотренные диэлектрические усилители еще далеки от совершенства. У них низок к. п. д., мала выходная мощность, недостаточно высок коэффициент усиления, их параметры не являются стабильными.

Эти недостатки обусловлены главным образом диэлектрическими потерями в сегнетоэлектриках, эффектом их старения и зависимостью коэффициентов нелинейности от температуры. Однако уже сейчас диэлектрические усилители по весу, габаритам, простоте и дешевизне не уступают аналогичным магнитным усилителям. Кроме того, диэлектрические усилители имеют и важное преимущество. Их входное сопротивление всегда больше выходного, что

облегчает создание многокаскадных усилителей. Наконец, диэлектрический усилитель отличается большой механической прочностью и не требует времени на разогрев.

## Частотная модуляция и управление частотой колебательного контура

Вариконды можно эффективно использовать в частотных модуляторах. Емкость вариконда при определенных условиях под влиянием управляющего напряжения изменяется в 4—5 раз. Поэтому, включая вариконд в контур генератора с самовозбуждением, можно получить изменение частоты в 1,5—2 раза.

На рис. 27 дана схема простейшего генератора с модуляцией частоты при помощи вариконда (предложена и исследована В. П. Кульцеп). Желательно, чтобы на-

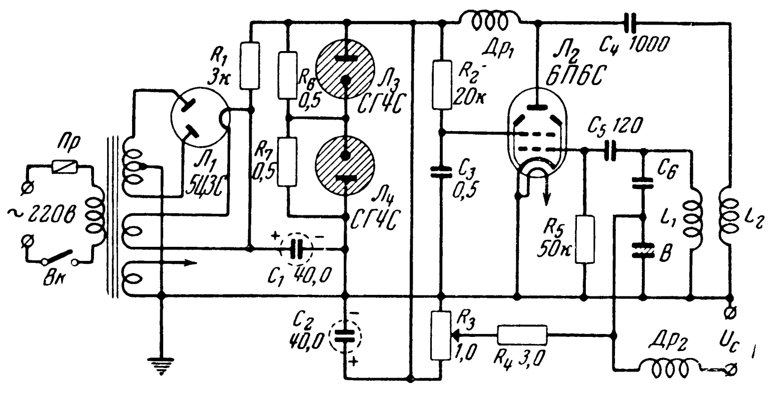



Рис. 27. Схема частотного модулятора с варикондом.

пряжение на контуре было не менее 30—50 *в*. При других значениях напряжения вариконд будет работать не в оптимальном режиме. С целью уменьшения паразитной амплитудной модуляции выгодно применять лампу с низким внутренним сопротивлением. Для этого же включен конденсатор $C_6$, емкость которого берется много больше емкости вариконда, чтобы не уменьшать значительно девиацию частоты. Можно также вместо $C_6$ брать второй, одинаковый с первым, вариконд. Стабилизированное напряжение от выпрямителя используется для анодного питания и подачи смещения на вариконд (через потенциометр $R_3$). Регулируя смещение, можно в некоторых пределах изменять среднюю частоту контура. Модулирующее напряжение $U_c$

подается на вариконд через разделительный дроссель $Др_2$.

Для частотной модуляции в диапазоне частот от сотен до десятков мегагерц применяются главным образом вариконды типов ВК1-0 и ВК1-1.

Предельные частоты, при которых могут использоваться вариконды, ограничены сравнительно высокими значениями их емкости, а также диэлектрическими потерями в сегнетоэлектрике. В настоящее время с помощью малогабаритных варикондов типа ВК1-М уже получена частотная модуляции на частотах до 200 *Мгц* и показана возможность ее осуществления при частотах до нескольких тысяч мегагерц.

Вариконды служат также для настройки входных контуров приемников, устройства переменной избирательности в каскадах промежуточной частоты и подстройки различных фильтров. С использованием варикондa могут быть осуществлены генераторы качающейся частоты, частотно-модулированные передатчики и другие устройства. Полоса качания частоты в них определяется крутизной реверсивной характеристики емкости. Генератор качающейся частоты на варикондах позволяет получать отклонение частоты на 6 *Мгц* при средней частоте 53 *Мгц*.

Для настройки панорамных приемников за рубежом применяют сегнетокерамические конденсаторы из аэровакса. На таких конденсаторах были разработаны две модели приемников, у которых частота изменялась от 28 до 60 и от 55 до 110 *Мгц*. Ведутся работы над расширением диапазона настройки в сторону более высоких частот: до 200—400 *Мгц*. Однако пока еще остается нерешенной проблема снижения возрастающих с частотой диэлектрических потерь сегнетоэлектриков. Создание конструкций варикондов на малые емкости будет способствовать применению их в диапазоне сверхвысоких частот.

При частотной модуляции с варикондом частота качания при малых отклонениях частоты может достигать 500 *кгц*.

Весьма перспективным является использование варикондов для генераторов помех. Нестабильность варикондов, которая характерна для всех сегнетоэлектриков, в этом случае не может быть серьезным препятствием для их применения.

Преимуществами частотных модуляторов на варикондах являются их незначительные размеры, крайне малое потребление энергии от источников модулирующего напряжения, простота и удобство управления, возможность осу-

ществления модуляции в широких пределах в области как низких, так и высоких частот. Появляется возможность в некоторых случаях заменить громоздкие и дорогие конденсаторы переменной емкости, полностью герметизировать контур, осуществлять дистанционную электрическую настройку контура на больших расстояниях.

## Умножители частоты

Принцип умножения частоты с помощью сегнетоэлектриков основан на искажении формы тока, протекающего через нелинейную емкость, под действием синусоидального напряжения.

На рис. 28 показаны графики, поясняющие работу диэлектрического умножителя частоты. График *а* представляет приближенную зависимость заряда $Q$ от напряженности поля $E$ (для упрощения гистерезисом пренебрегаем). Синусоидальное изменение величины $E$ изображено на графике *б*. Так как амплитуда напряжения выбрана достаточно

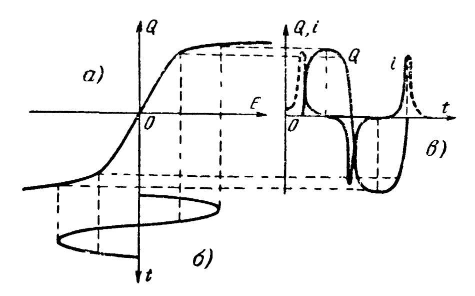



Рис. 28. Графики, поясняющие принцип действия диэлектрического умножителя частоты.

большой, то в течение значительной доли периода достигается насыщение. Вследствие этого график изменения заряда, показанный на рис. 28, *в*, резко отличается от синусоиды. Бо́льшую часть периода величина $Q$ меняется мало.

Имея график для заряда, нетрудно построить график для тока $i$ на основании следующих соображений. Приращение заряда конденсатора $\Delta Q$ за время $\Delta t$, очевидно, равно $i\Delta t$. Отсюда получаем:

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}.$$

Следовательно, ток будет максимальным в моменты наиболее резкого изменения заряда, а когда заряд изменяется

незначительно, ток имеет малую величину. Как видно, ток получается в виде кратковременных остроконечных импульсов различной полярности. В подобном несинусоидальном токе резко выражены нечетные гармоники. Чем больше напряжение, приложенное к нелинейному конденсатору, тем острее импульсы тока и тем более высокого порядка гармоники могут быть выделены.

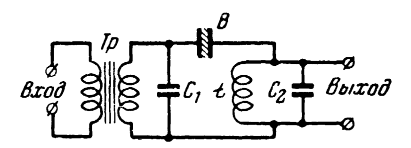



Рис. 29. Схема умножителя частоты резонансного типа.

Диэлектрический умножитель частоты резонансного типа, а также схемы трехфазного умножения частоты с использованием в качестве нелинейного элемента конденсатора из сегнетовой соли или титаната бария были предложены В. П. Вологдиным.

В резонансном умножителе частоты (рис. 29) для выделения выбранной высшей гармоники служит резонансный контур $LC_2$, который настраивается на частоту этой гармоники.

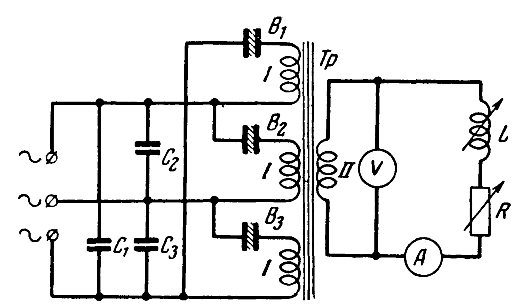



Рис. 30. Схема трехфазного диэлектрического умножителя частоты.

Применение многофазных схем дает значительное увеличение мощности, которая линейно растет пропорционально числу фаз.

Схема трехфазного диэлектрического умножителя частоты на варикондах, предложенная В. П. Сидоренко, показана на рис. 30. Принцип действия такого умножителя основан на искажении формы кривой тока в цепи, содержащей вариконд, с одновременным использованием

свойств многофазной системы. Обмотка *I* трансформатора *Тр* питается от трехфазного генератора, дающего напряжение 200 *в* с частотой 500 *гц*. Умножитель построен на трех блоках $B_1$, $B_2$ и $B_3$, собранных из варикондов ВК1-4 и имеющих начальную емкость 0,15 *мкф*. На обмотке *II* трансформатора было получено напряжение с утроенной частотой.

Выходная мощность умножителя зависит от величины нагрузки. Наивыгоднейшей является активно-индуктивная нагрузка с $\cos\varphi = 0{,}7 \div 0{,}8$. В этом случае напряжение на выходе мало зависит от величины нагрузки в широком интервале температур (от —60 до 50° С). Коэффициент полезного действия умножителя достигал 50%, а выходная мощность составляла 50 *ва*.

## Генераторы импульсов

Искажение формы кривой тока, протекающего через вариконд, может быть использовано для получения импульсов из синусоидального напряжения. Принципиальная схема генератора импульсов состоит из последовательно включенных вариконда, активного сопротивления и источника синусоидального напряжения. Напряжение на активном сопротивлении пропорционально току через вариконд и имеет форму остроконечных импульсов. Чтобы выделить импульсы одной полярности, включают выпрямитель (диод).

Простейшая схема формирования импульса представлена на рис. 31. При синусоидальном напряжении 127—250 *в* с

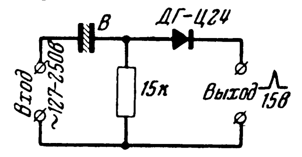



Рис. 31. Простейшая схема с варикондом для формирования импульсов.

частотой 50 *гц* на выходе получаются короткие импульсы, длительностью 1—2 *мсек*, с амплитудой 15 *в* и выше. Нелинейным элементом схемы служит вариконд *В* типа ВК1-2 или ВК1-3 или другой.

Область применения диэлектрических импульсных генераторов может быть шире, чем у пик-трансформаторов, вследствие незначительной зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков от частоты.

Простота устройства, небольшие размеры и вес, устойчивость по отношению к ударам и вибрациям, большой срок службы делают весьма удобным и надежным применение варикондов в импульсных схемах диспетчерского контроля.

## Стабилизаторы переменного напряжения

Простейшая схема диэлектрического стабилизатора переменного напряжения представляет собой последовательное соединение линейного конденсатора с нелинейным. На них подается напряжение, которое распределяется обратно пропорционально величинам емкостей. С ростом напряжения нелинейная емкость растет, что вызывает перераспределение напряжения между конденсаторами. Относительное изменение напряжения на линейном конденсаторе будет значительно меньше, чем общего напряжения.

В связи с тем, что диэлектрическая проницаемость вариконда достигает максимального значения в сравнительно слабом переменном поле, были предложены схемы стабилизаторов напряжения с двойной компенсацией, в которых использованы как восходящий, так и падающий участки кривой $C=f\ (U_{\sim})$.

Значительная зависимость диэлектрической проницаемости вариконда от напряженности постоянного поля позволила разработать схемы стабилизаторов с управлением по постоянному току (рис. 32). Такой стабилизатор состоит из варикондов *В*, включенных последовательно с нагрузочным

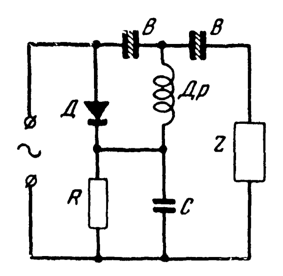



Рис. 32. Схема стабилизатора напряжения с управлением по постоянному току.

сопротивлением *Z*, и выпрямляющего устройства, содержащего диод *Д* и сопротивление нагрузки *R*, шунтированное конденсатором *С*.

С увеличением переменного напряжения возрастает выпрямленное постоянное напряжение, подаваемое на вари-

конды, а ток в их цепи уменьшается, так как увеличивается сопротивление варикондов. Поэтому выходное напряжение увеличивается незначительно.

Рабочий режим вариконда в подобной схеме подбирается изменением сопротивления нагрузки детектора с таким расчетом, чтобы рабочая точка лежала на участке наибольшей крутизны кривой $C=f\ (U_{=})$.

Эффект стабилизации резко возрастает, если усилить постоянное управляющее напряжение усилителем постоянного тока. Увеличивая коэффициент усиления, можно сделать коэффициент стабилизации достаточно большим.

Стабилизатор напряжения на варикондах с управлением по постоянному току, даже при больших мощностях, потребляет на управление ничтожно малые токи, определяемые только сопротивлением изоляции вариконда. Такой стабилизатор отличается малым весом по сравнению с известными типами.

## Вариконды в качестве датчиков для контроля температуры

Для создания датчиков в схемах контроля температуры на расстоянии используется слабая температурная зависимость емкости варикондов в области сильного переменного поля. В широком интервале температур вплоть до точки Кюри при соответственном выборе переменного напряжения емкость варикондов сохраняет почти постоянное значение. Выше же температуры Кюри емкость вариконда резко снижается (в 4—5 раз.)

В схемах контроля температуры подшипников, исследованных И. Э. Биренбергом, использовались элементы блока ВК1-4 с начальной емкостью 20 000 *пф*. Поляризованное реле, включенное в схему с варикондом, надежно срабатывало при нагреве вариконда до 75—80° С.

При изменении температуры от 70 до 80° С ток, протекающий через вариконд, снижается с 10 до 2,5—3 *ма*, чего вполне достаточно для срабатывания реле. Тепловая инерционность варикондов невелика и вполне удовлетворяет условиям температурного контроля ряда объектов. Время установления тока для ВК1-4 составляло около 15 *сек*, а для блока емкостью 0,1 *мкф* — около 1 *мин*.

Для контроля температуры можно также использовать эффект резкого возрастания $\varepsilon$ сегнетоэлектриков вблизи точки Кюри при слабом переменном поле.

## Заключение

В последнее время создаются и исследуются многие новые схемы с применением варикондов в качестве нелинейных элементов.

Диэлектрические усилители переводятся в режим генерирования колебаний. Создаются мультивибраторы, генерирующие колебания прямоугольной формы. Предлагаются устройства для получения мигающего света, например для сигнализации. Разрабатываются схемы бесконтактного емкостного реле с выдержкой, не зависящие от колебания напряжений.

Возрастание диэлектрической проницаемости варикондов при повышении напряжения можно использовать для гашения искры от экстратоков путем создания неотключаемого шунта у электрических контактов. Шунты на варикондах могут применяться в цепях, питаемых переменным током, например в вызывных цепях телефонной связи, цепях звонков, сирен, реле переменного тока и др. В момент разрыва электрической цепи возникает э. д. с. самоиндукции, которая в несколько раз превосходит напряжение питания; емкость вариконда повышается, и сопротивление его экстратоку резко падает. Этим и достигается большое шунтирующее действие варикондов.

Предложены диэлектрические усилители на варикондах к фотоэлектронным умножителям. Исследуются схемы для преобразования постоянного тока в переменный, для формирования импульсов большой амплитуды и малой длительности, равной долям миллисекунды и микросекундам, а также импульсов переменной длительности. Создаются стабилизаторы напряжения на звуковые частоты, фазорегуляторы, устройства для повышения $\cos \varphi$.

Применение варикондов в качестве нелинейных элементов приводит к новым конструкциям узлов аппаратуры, повышению надежности работы, уменьшению веса и габаритов.

Но нельзя забывать и о важнейших недостатках существующих варикондов.

Основным недостатком являются значительные диэлектрические потери в материале ВК-1. За счет них получается заметный разогрев диэлектрика вариконда при больших напряжениях и высоких частотах. Однако создание новых сегнетокерамических материалов с меньшими диэлектрическими потерями по сравнению с материалом ВК-1 позволит

повысить рабочие напряжения и рабочие частоты варикондов.

Нестабильность характеристик варикондов существенным образом сказывается при изменении температуры окружающей среды. Поэтому разработка термокомпенсированных варикондов является важным этапом в решении задачи повышения стабильности новых типов нелинейных элементов.

Изготовление варикондов в условиях мелкосерийного производства создает значительный разброс параметров отдельных образцов одной и той же партии. Этот недостаток может быть в значительной степени устранен при строгом соблюдении технологического режима в массовом производстве варикондов.

Другие недостатки варикондов, несомненно, будут устранены при проведении дальнейших исследований и создании новых разнообразных сегнетоэлектриков с высокими нелинейными свойствами.

Совместные исследования специалистов в области физики и радиотехники по изучению свойств сегнетокерамических материалов и особенностей работы варикондов в различных условиях помогут найти оптимальные решения для создания новых видов аппаратуры с применением нелинейных сегнетокерамических элементов.

---

# ЛИТЕРАТУРА

Курчатов И. В., Сегнетеэлектрики, ГТТИ, 1933.

Вул Б. М., Вещества с высокой и сверхвысокой проницаемостью, «Электричество», 1946, № 3.

Вологдин В. П., Новый генератор повышенных и высоких частот, «Электричество», 1946, № 8.

Сканави Г. И. и Нейман М. Д., Стабилизация напряжения с применением конденсаторов из титаната бария, «Электричество», 1949, № 7.

Казарновский Д. М., Сегнетокерамика в электротехнической аппаратуре, «Электричество», 1954, № 2.

Вербицкая Т. Н., Сегнетокерамика с резко выраженными нелинейными свойствами, ДАН СССР, 1955, т. 100, № 1, новая серия.

Вербицкая Т. и Кульцеп В., Усилитель НЧ и частотный модулятор на варикондах, «Радио», 1955, № 11.

Казарновский Д. М. и Сидоренко В. П., Применение сегнетоэлектриков в умножителях частоты, Известия Академии наук СССР, серия физическая, т. 21, № 3, 1957.

Смоленский Г. А. и Исупов В. А., Сегнетоэлектрики, Издание Академии наук СССР, Институт полупроводников, 1956.

Вул Б. М., О нелинейных свойствах сегнетоэлектриков, Известия Академии наук СССР, серия физическая т. 21, № 3, 1957.

Кольцов Б. В., Применение варикондов, «Радио», 1957, № 9.

Колесов Л. Н. и Циколин Г. Н., К вопросу управления частотой лампового генератора с помощью сегнетоэлектрических конденсаторов, Труды первой межвузовской конференции по современной технике диэлектриков и полупроводников, ЛЭТИ, 1957.

О применении нелинейных конденсаторов для настройки широкодиапазонных приборов и стабилизации частоты, «Новости зарубежной радиоэлектроники», 1958, № 1 и 4, «Вопросы радиолокационной техники», 1952, № 4 (10) и 1956, № 2 (32), Издательство иностранной литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ

Цена 1 р. 45 к.